

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



**ASAGAI**

ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Número 41 • 2018

ISSN 2422-5703 (En línea)

ISSN 1851-7838 (Impresa)

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
editor@editoresasagai.org.ar  
www.editoresasagai.org.ar  
www.asagai.org.ar  
Tel/Fax (011)4322-2820





---

## REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

### EDITOR JEFE

*MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman*  
UCIS Consultores  
editor@editoresasagai.org.ar

### EDITOR ASOCIADO

*Dr. Clemente Irigaray Fernández*  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Granada  
España  
clemente@ugr.es

### COMITÉ EDITORIAL

*Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo*  
Departamento de Geodinámica  
Universidad Complutense de Madrid  
España  
vallejo@geo.ucm.es

*Dr. Julio Luis del Río*  
Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario  
Universidad Nacional de Mar del Plata  
Argentina  
julioluisdelrio@gmail.com

*Dra. Ofelia Tujchneider*  
Departamento de Hidrología y Ambiente  
Universidad Nacional de El Litoral. Santa Fe  
Argentina  
pichy@fich1.unl.edu.ar

*Lic. Luis Mario Giaconi*  
Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)  
Universidad Nacional de La Plata  
Argentina  
lmgiaconi@gmail.com

*Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé*  
Departamento de Engenharia Geotécnica  
Politécnico do Porto  
Portugal  
hic@isep.ipp.pt

*Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso*  
Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental  
Universidade Federal de Santa Maria  
Brasil  
malvamancuso@ufsm.br

### SECRETARIA

*Dra. María Paula Bunico*  
IGEBA (CONICET-UBA)  
Argentina  
secretaria@editoresasagai.org.ar

### PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño *Paula Paredes*  
paulaparedes13@hotmail.com

Webmaster *Guillermo Saint*  
saintdisegno@arnet.com.ar

---

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

**COMISIÓN DIRECTIVA 2014 - 2018**

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Fabio Sergio Luna</i>
SECRETARIA	<i>Cristina Dapeña</i>
TESORERO	<i>Alejandro Emmanuel Celli</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén A. López</i>
VOCAL TITULAR	<i>Julia Löffler</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Gabriela Coelho dos Santos</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>María Beatriz Ponce</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José Gabriel Salminci</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Cristian Elías Cocchiarale</i>

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG - Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
asagai@asagai.org.ar  
www.asagai.org.ar

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Mapa geotécnico de la ciudad de Treinta y Tres, Uruguay	<i>Ferrizo, Héctor - Abre, Paulina - Blanco, Gonzalo - López, Valentina</i>	1
Geología aplicada a la detección de la fuente de filtraciones en la Boca II del túnel de aducción del complejo hidroeléctrico Futaleufú, provincia de Chubut	<i>Celli, Alejandro E. - Reynal, Héctor R.</i>	15
Movilidad de sales por ascenso capilar a partir del acuífero freático en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca	<i>Lexow, Claudio - Scherger, Leonardo - Pera Vallejos, Guillermo - Bauer, Emiliano</i>	27
Patrón de micro distribución de <i>Ctenomys Talarum</i> , su rol como bioindicador en un pasivo de explotación de arenas en dunas costeras	<i>Taverna, Bernardo Daniel - del Río, Julio Luis - Antenucci, Daniel</i>	37
Instrucciones para autores		45
Formulario de suscripción o compra		49



## MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

### Misión y objetivos de la publicación

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* es la publicación oficial en Argentina de la asociación miembro de la *International Association of Engineering Geology and the Environment*. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* se define, en los estatutos de la IAEG, como “la ciencia dedicada a la investigación, estudio y solución de los problemas ambientales e ingenieriles que correspondan como resultado de la interacción entre la geología y las obras y actividades del ser humano, así como de la predicción y del desarrollo de medidas previsoras o de corrección de los peligros geológicos”. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* comprende: “la definición de la geomorfología, estructura, estratigrafía, litología y los acuíferos de las formaciones geológicas, las propiedades químicas e hidráulicas de todos los materiales involucrados en la construcción, extracción de recursos y cambio ambiental; la valoración del comportamiento hidrológico y mecánico de los suelos y macizos rocosos; la predicción de los cambios de las anteriores propiedades con el tiempo; la determinación de los parámetros a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de las obras de ingeniería y de los terrenos; el mantenimiento y mejora de la condición ambiental del terreno”

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* tiene por objeto fomentar la publicación y difusión de artículos originales de calidad en todos los ámbitos propios, así como la difusión de noticias sobre eventos y publicaciones de interés en la temática. Está dirigida a científicos y profesionales geólogos, ingenieros y tecnólogos.

En todos los casos, las opiniones vertidas en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan posiciones oficiales de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Todos los artículos son sometidos a un proceso de revisión por pares a cargo de especialistas de reconocido prestigio que colaboran, a tal fin, voluntariamente y sin lucro alguno, con la Revista.

### Leyenda de protección de derechos de autor

Todos los artículos publicados en esta Revista cuentan con protección de los derechos de autor. Ninguna parte del material publicado aquí podrá ser reproducido, transmitido, almacenado o utilizado en ninguna forma o por cualquier medio gráfico, electrónico, o mecánico, incluyendo, pero no limitándose a, el fotocopiado, grabación, escaneo, digitalización, grabación en cinta, distribución en la Web, redes de información, o sistemas de almacenamiento y recuperación, sin permiso previamente aceptado del Editor.

El autor podrá incluir una versión del artículo en su propio sitio Web o en el de su institución. Los Autores podrán reproducir el Artículo, total o parcialmente, y difundir su contenido o ponerlo a disposición del público, en formato impreso o electrónico, como parte de un contenido docente o como una recopilación, para su uso en el ámbito académico o de investigación en la institución a la que pertenezcan, citando que fue publicado en la revista.

### Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista deberán contactarse con la Editorial ([editor@editoresasagai.org.ar](mailto:editor@editoresasagai.org.ar)).

En la página 49 encontrará el formulario a completar a tal efecto

## Aims and objectives

*The Journal of Engineering and Environmental Geology (JEEG) is the official publication in Argentina of the corresponding association of the **International Association of Engineering Geology and the Environment**. "Engineering geology, is defined in the statutes of the IAEG as the science devoted to the investigation, study and solution of engineering and environmental problems which may arise as the result of the interaction between geology and the works or activities of man, as well as of the prediction of and development of measures for the prevention or remediation of geological hazards. Engineering geology embraces: the definition of the geomorphology, structure, stratigraphy, lithology and ground water conditions of geological formations; the characterisation of the mineralogical, physico-geomechanical, chemical and hydraulic properties of all earth materials involved in construction, resource recovery and environmental change; the assessment of the mechanical and hydrological behaviour of soil and rock masses; the prediction of changes to the above properties with time; the determination of the parameters to be considered in the stability analysis of engineering works and earth masses; the improvement and maintenance of the environmental condition and properties of the terrain".*

*The aims of this journal are the publication and diffusion of original quality paper in all related fields and also the diffusion of news about related events and publications of interest. It is addressed to scientist and professional geologists, engineers and technologists.*

*In any case, the opinions expressed in this publication are responsibility of the authors and do not reflect official positions of the Argentina Association of Engineering Geology. All items are submitted to a peer review process by renowned specialists who collaborate to that end, voluntarily and without any profit, with the Journal.*

## Authors Copyrights

*All papers published in this Journal are protected by copyrights. No part of published material covered herein may be reproduced, transmitted, stored, or used in any form or by any means graphic, electronic, or mechanical, including but not limited to photocopying, recording, scanning, digitizing, taping, Web distribution, information networks, or information storage and retrieval systems, without a previously accepted permission by the Editor.*

*The author(s) will be allowed to include a paper version in his own or institutional Web site. The author(s) may reproduce the paper, totally or partially, and diffuse it contain or let it available to the public in impressed or electronic format only as a part of a teaching context or as a state-of-the art reviewing, for it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.*

## Price of the Journal

*All interested in buying a copy of any Journal issue should be in contact with the Editor ([editor@editoresasagai.org.ar](mailto:editor@editoresasagai.org.ar)).*

*In page 49 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



# Mapa geotécnico de la ciudad de Treinta y Tres, Uruguay

## Geotechnical map of Treinta y Tres city, Uruguay

Ferrizo, Héctor <sup>1</sup> ✉ - Abre, Paulina <sup>1</sup> - Blanco, Gonzalo <sup>1</sup> - López, Valentina <sup>1</sup>

Recibido: 05 de julio de 2018 • Aceptado: 10 de diciembre de 2018

### Resumen

*Este trabajo pretende unificar los conocimientos geológicos y geotécnicos del subsuelo urbano de la ciudad de Treinta y Tres, ubicada al este de Uruguay, a partir de la recopilación y almacenamiento de datos de campo, en forma digital, en un Sistema de Información Geográfica, utilizando el software libre Qgis. Los usos de estos mapas son variados, desde la planificación de proyectos de ingeniería hasta el ordenamiento territorial de la ciudad.*

*El subsuelo de la ciudad de Treinta y Tres, geotécnicamente se corresponde con cuatro unidades formacionales no consolidadas, superficiales y una unidad rocosa.*

*Cada unidad presenta sus rasgos físicos propios, y se las clasificó según el material presente, la profundidad del suelo orgánico, presencia de agua y la excavabilidad referente. Se logró incorporar un importante volumen de información, generando una cartografía precisa y de fácil manejo, de modo que sirva como soporte y consulta para futuros trabajos de ingeniería que se lleven a cabo en suelo de la ciudad. El SIG generado permite, además, incorporar fácilmente nuevos datos que puedan obtenerse en futuras investigaciones.*

**Palabras claves:** geotécnico; Sistema de Información Geográfica; excavabilidad; Treinta y Tres.

### Abstract

*This work aims to unify the geological and geotechnical knowledge of the urban subsoil of the city of Treinta y Tres, located in the east of Uruguay, from the collection and storage of field data, in digital form, in a Geographical Information System, using the free software Qgis. The uses of these maps are varied, from the planning of engineering projects to the territorial ordering of the city.*

*The subsoil of the city of Treinta y Tres, geotechnically corresponds to four unconsolidated, superficial formational units and a rocky unit.*

*Each unit presents its own physical features, and classified according to the material present, the depth of the organic soil, presence of water and the ability to excavate the material. It was possible to incorporate an important volume of information, generating an accurate and easy to use cartography, so that it serves as support and consultation for future engineering works that are carried out in the city's soil. The generated GIS also allows to easily incorporate new data that can be obtained in future research.*

1. Centro Universitario Regional Este, Sede Treinta y Tres (UdelaR),  
Ruta 8, km 282, Treinta y Tres, Uruguay.

✉ hferrizo@hotmail.com

**Keywords:** geotechnical; Geographic Information System; excavability; Treinta y Tres.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios geotécnicos determinan el comportamiento y las características del terreno, a partir del estudio de las propiedades mecánicas de los materiales depositados o conformados por la alteración de la roca madre. Los parámetros geotécnicos del subsuelo, raramente se consideran durante los trabajos que se realizan para ubicar una obra o para la planificación territorial de una ciudad en Uruguay.

En este trabajo, se presenta la carta geotécnica de la ciudad de Treinta y Tres, la metodología utilizada en la obtención de la información y los resultados finales. La idea surgió al momento de disponer de numerosas excavaciones, que por distintos motivos de obras, se fueron realizando durante un período de más de 2 años, en lo que corresponde a la planta urbana de la ciudad. Para construir esta base de datos se realizó fotointerpretación, observaciones de campo tomadas en calicatas, datos de pozos semisurgentes aportados por las empresas de perforación, cartografía y georreferenciación de la información obtenida.

Como base de información se confeccionó un mapa geológico, para representar las litologías presentes en el área de estudio.

Desde el punto de vista geotécnico se caracterizaron los materiales, agrupándolos según sus características físicas, presencia de nivel freático y comportamiento frente a la excavabilidad. La evaluación y diagnóstico de estas propiedades, y su

consecuente procesamiento y análisis en un Sistema de Información Geográfica (SIG), culminó en un mapa geotécnico básico, que es una herramienta de gran ayuda a la hora de tomar decisiones para proyectos futuros.

La ciudad de Treinta y Tres es la capital del departamento del mismo nombre, situado en el sector centro este del territorio uruguayo (Figura 1). Se ubica en la margen izquierda del río Olimar en su confluencia con el arroyo Yermal. La población es de aproximadamente 30000 habitantes. Desde el punto de vista geomorfológico Treinta y Tres y su entorno, están ubicados sobre planicies con suaves ondulaciones, que no sobrepasan los 65 metros de altitud.

En cuanto a la infraestructura vial, varias rutas se entrecruzan en este lugar, siendo la más importante la ruta nacional N° 8.

Al ser el área estudiada una zona residencial, densamente poblada, el trabajo comenzó al observar que por diferentes obras de ingeniería, quedaban descubiertos afloramientos de los materiales del subsuelo, generando importante cantidad de datos, aprovechables solo durante el lapso de la obra, los cuales, nos brindan abundante conocimiento del subsuelo de la ciudad.

Así y con el paso del tiempo, se recogieron todos los datos posibles de cada lugar expuesto y se plasmó en una cartografía a escala 1: 25.000.

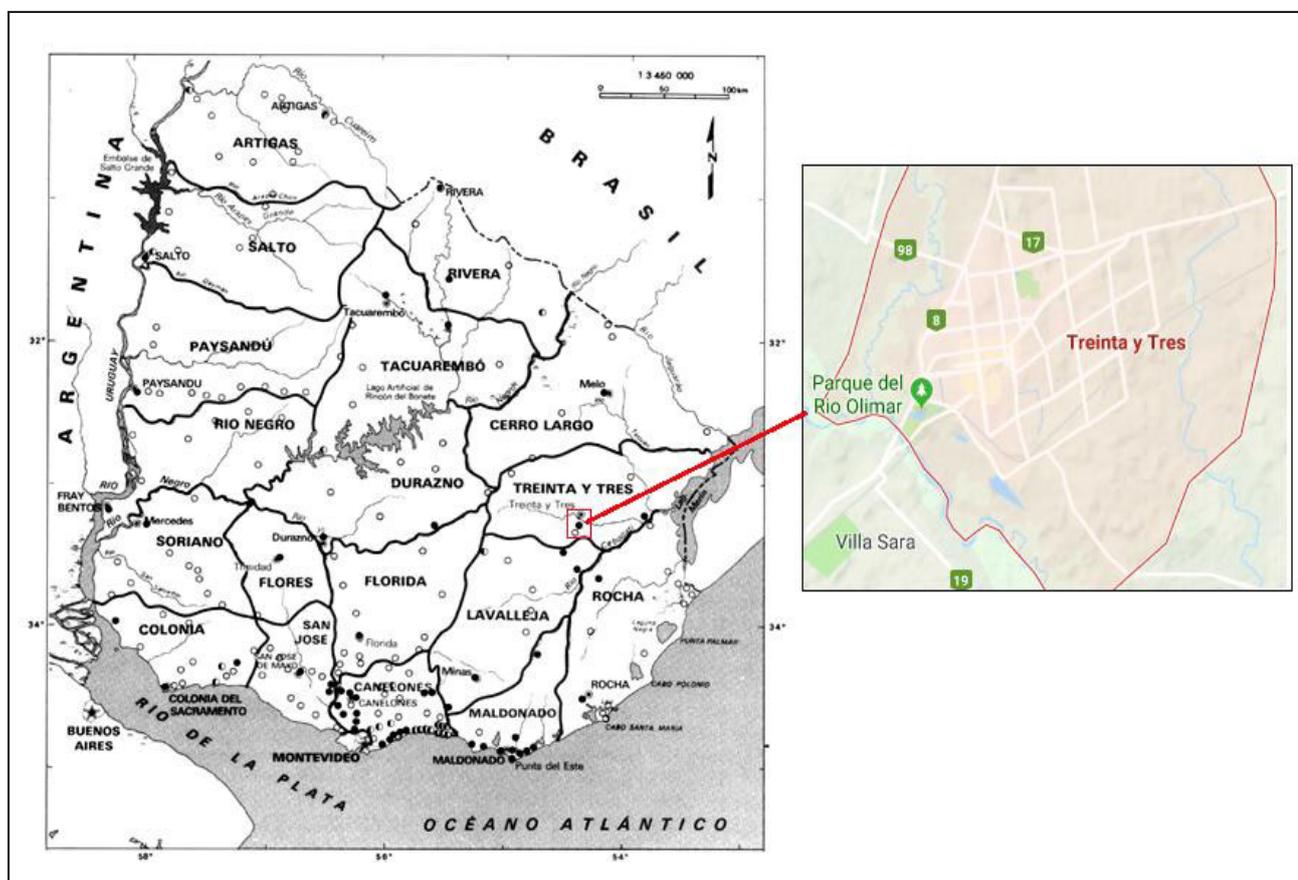


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Treinta y Tres, en el mapa político de Uruguay.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada consistió en trabajos de campo y seguimiento de obras en ejecución, con un conjunto de puntos de observación del terreno, y su almacenamiento y gestión de datos a través de un Sistema de Información Geográfica, implementado con el software libre Qgis (Figura 2).

En este software se hizo la entrada de los datos de campo, tales como: geología de detalle, tablas, capas, perfiles, fotos, etc., creando una base de datos para su posterior manejo, vincular la información de la distribución y espesor de las unidades geológicas y propiedades geotécnicas e hidrogeológicas de cada unidad, estableciendo esto como criterio de identificación y mapeo geotécnico.

La concreción de este trabajo, fue alcanzada de acuerdo a las siguientes fases:

- Ubicación y relevamiento de las calicatas, excavaciones o pozos que se realizaron en diferentes obras de la ciudad.
- Ubicación geográfica de puntos en Google Earth.
- Descripción de la columna litológica, caracterización del terreno y condiciones hidrogeológicas.
- Descripción y toma de muestras suficientemente representativas de algunos de los niveles identificados.
- Toma de fotografías.
- Creación de una base de datos en Qgis.
- Fotointerpretación, sobre un mosaico de fotos aéreas a escala 1:20.000, a efectos de definir las unidades geológicas y estructuras presentes en la zona de estudio.
- Utilización de la Carta Geológica de Uruguay a escala 1:500.000.

- Datos aportados por empresas de perforaciones de pozos semisurgentes.
- Datos aportados por personas adultas, las cuales conocen el terreno o incluso llegaron a trabajar en algunas canteras de extracción de materiales.
- Mapeo de puntos con características geológicas-geotécnicas similares.
- Creación de capas raster y vectoriales en el Qgis.
- Nuevos datos a la base Qgis.
- Obtención del mapa geotécnico a escala 1: 25.000.

Así mismo, se ha prestado atención a las características de excavabilidad y estabilidad de las paredes en cada pozo o zanja, al igual que a la posible aparición de humedad indicativa de la proximidad del nivel freático.

Fueron observados y descritos más de 40 puntos directos, además de consultas bibliográficas y aportes de vecinos y empleados de empresas de perforación para agua, mediante comunicación personal.

Finalmente, con toda la información espacial georreferenciada dispuestas en capas o layers se interpretó y generó un mapa geológico-geotécnico de la ciudad de Treinta y Tres, y sus alrededores.

## TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo consistió en recoger información en los 42 puntos observados, distribuidos en la región urbana y sub urbana de Treinta y Tres. Por otro lado se visitaron cortes geológicos ubicados en el trazado de la vía férrea, canteras antiguas y recientes y afloramientos en campos alrededor de la ciudad.

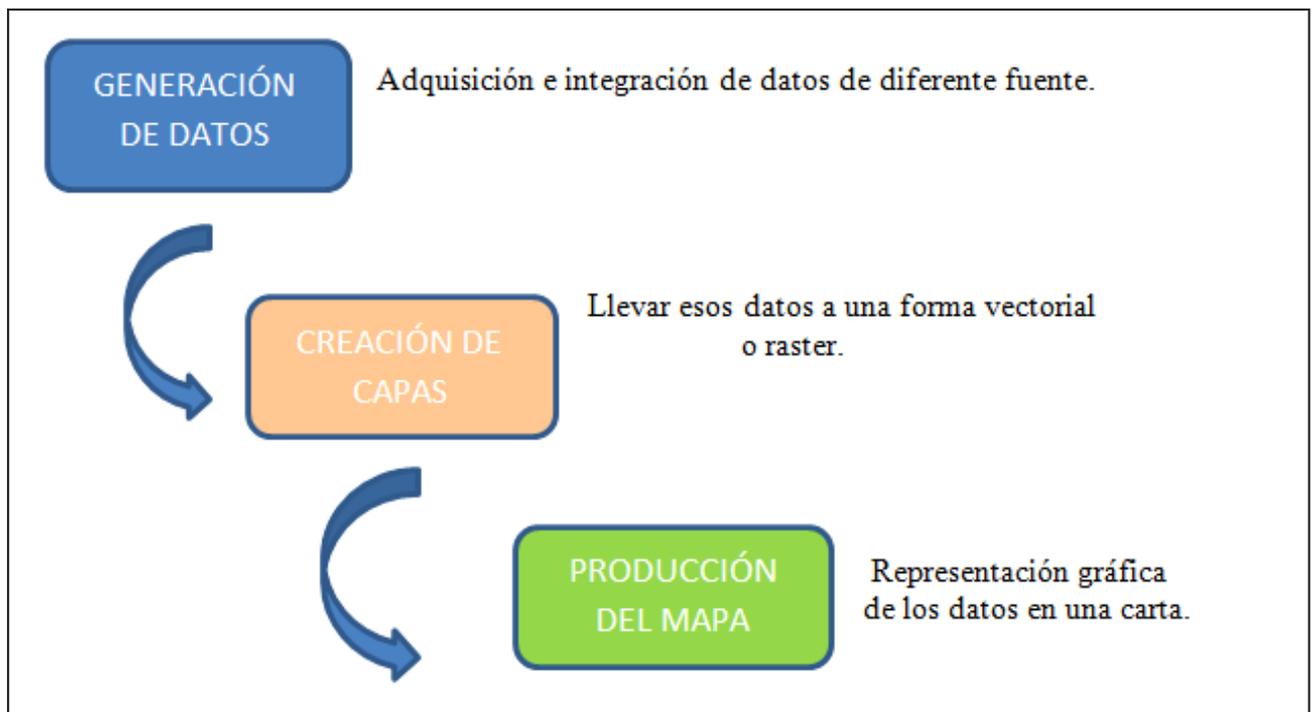


Figura 2. Proceso de la cartografía geotécnica en el software Qgis.

Se procedió a describir el material, medir profundidades, ver el tipo de dureza presente, observar presencia de agua, extraer muestras y georreferenciar los puntos.

El procesamiento de la información geológico-geotécnica recabada en campo, como características litológicas, dureza y presencia de agua, permitieron obtener las unidades geotécnicas o dominios geomecánicos. Para lograr mapear estas unidades, además de las consideraciones en los puntos de observación se utilizaron técnicas cartográficas y de interpretación del terreno en base a su fisonomía por curvas de nivel.

## ENTORNO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra en el borde oeste de una cuenca Mesozoica-Cenozoica, denominada Fosa Tectónica de la Laguna Merín. En esta área afloran rocas de la megacizalla de Sierra Ballena, rocas del basamento cristalino (Terreno Cuchilla Dionisio), y basaltos productos de derrames de la mencionada cuenca. Parcialmente estos materiales están cubiertos por depósitos cuaternarios de origen continental (*Bossi et al., 1998b*).

El Terreno Cuchilla Dionisio, de edad precámbrica, se compone de ortogneises y granitos. Los ortogneises presentan textura protomilonítica, son bandeados a muscovita y biotita, con porfiroclastos de ortosa, con cuarzo y mica. Las foliaciones mineral presente en estas rocas, van desde N20° a N 35°, con buzamientos subverticales. Asociada aparece la intrusión del granito Cuchilla Dionisio, el cual tiene textura porfirica y está compuesto por ortosa, plagioclasa, cuarzo y biotita (*Bossi y Gaucher, 2014*). La Zona de Cizalla de Sierra Ballena (*Gómez Rifas, 1995*), corresponde a una megaestructura de colisión entre los Terrenos Cuchilla Dionisio y Nico Pérez, generando una potente zona de cizalla de rumbo N20E, con presencia de milonitas y protomilonitas. Según la litología original, pueden variar de coloración, siendo las de origen granítico de colores claros y los pórfidos de coloración gris oscuro a negro. La foliación de las milonitas muestra rumbo N20°, predominantemente vertical. Al N de la zona mapeada afloran basaltos de edad cretácica, con textura amigdaliode y masivos, de coloraciones verdes a amarrotadas, correspondientes a derrames de la Fosa de la Laguna Merín (*Bossi & Schipilov, 1998*). A excepción de algunas áreas en donde afloran basaltos y milonitas, el resto del terreno está cubierto por una capa de sedimentos recientes, principalmente sobre las rocas gneisicas y el granito mencionado.

## UNIDADES GEOTÉCNICAS

Una unidad geotécnica es el conjunto de materiales con comportamiento y propiedades geotécnicas similares. Las principales observaciones fueron descripciones litológicas, textura del material, dureza, presencia de agua. A partir de las litologías presentes y de las características de los materiales observados en terreno, se definieron las unidades geotécnicas; luego, en base a fotointerpretación se extrapolaron los datos al resto del área para determinar su distribución espacial. Se delimitaron cinco unidades geotécnicas de acuerdo al tipo de material y según la profundidad que presentan. Corresponden a cuatro unidades superficiales de material no consolidado, compuestas de suelosedimentos y una unidad rocosa (Tabla 1).

Se verifica que el mayor porcentaje del área total estudiada está compuesta por material superficial no consolidado. Hay 16 km<sup>2</sup> de terrenos cubierto por materiales superficiales

no consolidados y 2 km<sup>2</sup> en donde la roca está aflorando o subaflorando.

## Caracterización geológico-geotécnica

En cuanto a la caracterización geológica de los materiales con visión geotécnica, se estudiaron los siguientes factores: tipo de roca (ínea, sedimentaria o metamórfica); fracturación (las discontinuidades facilitan el ripado); meteorización (rocas alteradas son de más fácil excavabilidad que las menos meteorizadas) y la fábrica (rocas de granos grueso se excavan más fácilmente que las de grano fino).

### Excavabilidad

La excavabilidad se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado.

Por el tipo de trabajo y su forma de crearlo, se optó por definir parámetros de excavabilidad, utilizando el criterio establecido en la Carta Geotécnica de la Región Metropolitana de Montevideo (*Goso et al., 1997*). Según estos autores, el grado de excavabilidad varía de E1 a E3 según el siguiente criterio:

- E1: Son materiales friables a medianamente friables, penetrables por la pala americana, y/o excavables a pico y pala sin auxilio de elementos escarificantes y fácilmente movibles por medios mecánicos.
- E2: Se incluyen en esta categoría los materiales medianamente friables a medianamente tenaces, los cuales pueden ser excavados a pico y pala, pero que eventualmente pueden endurecerse y tienen que ser movidos con elementos mecánicos o escarificación leve.
- E3: Entran en esta categoría, aquellos materiales medianamente tenaces a muy tenaces, que solo son penetrables mediante perforación rotopercutiva, martillos hidráulicos o explosivos.

La excavabilidad se pudo estimar en base a las metodologías empleadas y al tipo de maquinaria utilizada en el terreno, para el desarrollo de las distintas obras que fueron seguidas durante la etapa de toma de datos del presente trabajo.

### Hidrogeología

El subsuelo de la ciudad de Treinta y Tres, en términos generales presenta buen almacenamiento de aguas subterráneas, debido a su baja topografía, a la presencia de acuíferos fisurados y/o porosos, y a su entorno rodeado de cauces de agua. Es por ello que la humedad es permanente en la mayoría de las edificaciones de la ciudad. En referencia al estudio, el nivel freático corresponde a los niveles que alcanza el agua superficialmente en los huecos de observación. Asociado a este concepto está la permeabilidad que refiere a la capacidad de pasaje del agua en un terreno, y fue la propiedad observada en los materiales. La presencia de agua en el terreno, provoca alteraciones en las propiedades de los materiales, lo que resulta de mucha importancia en el momento de planificar una obra. Además de estas alteraciones, el agua puede causar flujos internos y fluidificación de materiales, con el consiguiente riesgo de movimientos en el terreno, catalogado como un riesgo geológico importante. Se detectaron zonas con condiciones de infiltración, que corresponden al nivel piezométrico de la zona, y en algunos casos una rápida inundación de la zona de trabajo. En los lugares observados, en general, el nivel freático se localiza entre 2 a 4 metros de profundidad.

## UNIDAD ROCOSA

### Caracterización geológico-geotécnica

En el caso de estudio, el macizo rocoso corresponde una amplia zona regional de fajas milonitizadas, con intrusiones graníticas, de rumbo NE, y de basaltos dispuestos en cuencas con eje alargado E-W.

De forma general, las milonitas, por su tamaño de grano y composición, son rocas de alta dureza, pero proclives a alterarse por los planos de cizallamiento que produce una foliación particular. En el área estudiada las foliaciones son subverticales, con orientaciones N 020°. Su composición es del tipo granítica, con porfiroclastos de feldespatos, en una matriz de cuarzo y moscovita. La alteración que presentan es superficial, como una delgada capa paralela a la superficie, aunque localmente puede existir una alteración más profunda en zonas afectadas por discontinuidades, pero los niveles de alteración no sobrepasan los 0,50 m de espesor. Los basaltos son de coloraciones verde amarronados, localmente vacuolares, presentan bajo grado de alteración o se encuentran no alterados, siendo su textura masiva, generando afloramientos rasos.

En cuanto a las características geotécnicas descritas en trabajos de empresas particulares, se puede deducir que este tipo de material, presenta alta tenacidad y resistencia, con valores entre 500 kPa para zonas superficiales alteradas, hasta 1000 kPa para zonas de roca fresca (Goso, E. 2016).

En cuanto a la presencia de suelos orgánicos, se observa que son muy poco potentes, con promedios de 0,30 m, alcanzando profundidades máximas de 0,50 m.

### Excavabilidad

De acuerdo a Gonzalez de Vallejo *et al* (2002), la resistencia que presenta un determinado macizo rocoso depende de varios factores, a saber, la resistencia de la matriz rocosa, la presencia de discontinuidades, las tensiones naturales y las condiciones geoambientales e hidrogeológicas a las que esté expuesto dicho macizo. Estos materiales presentan una resistencia considerablemente mayor a la penetración manual. La resistencia para este tipo de rocas se cataloga de media a alta, siendo necesaria la utilización de elementos mecánicos para su rotura. Estas rocas presentan localmente fracturación, que genera material disgregado por encima, y puede ser eventualmente excavado de forma manual a profundidades someras.

En la práctica, para poder trabajar en este tipo de rocas, se utilizan martillos neumáticos, martillos hidráulicos y puntualmente hay casos en los que se utilizaron voladuras para poder romper la roca. Por lo tanto, estos materiales se clasifican como E3.

### Hidrogeología

Desde la perspectiva hidrogeológica, estas rocas comprenden materiales en donde la permeabilidad se limita el área de fracturas, favoreciendo su alteración. Superficialmente, el comportamiento hidrogeológico de estas rocas está limitado casi exclusivamente, a zonas de discontinuidades. Por un lado, las milonitas, por su textura, son poco permeables, y los basaltos, cuando masivos, tienen un comportamiento similar. Generalmente las aguas freáticas o de escorrentía, circulan sobre su superficie, o en contacto con otras unidades, siendo de caso caudal.

## UNIDADES NO CONSOLIDADAS

### Caracterización geológico-geotécnica

Las unidades geotécnicas mapeadas como no consolidadas, están integradas por suelos orgánicos y depósitos sedimentarios de origen continental, siendo en su mayoría materiales friables.

Los suelos superficiales están formados por una capa fundamentalmente de tierra negra, con restos orgánicos, raíces y, en algunos puntos, restos antrópicos.

Los depósitos sedimentarios comprenden tres tipos de materiales:

Una cobertura de sedimentos arcillo-limosos, de color pardo amarillento, coloraciones ocre claritas a amarillento, con presencia de núcleos carbonáticos (conocida como Formación Libertad). Estas arcillas forman suelos potencialmente expansivos, y localmente comportamiento relativamente compactos, según el grado de humedad. Dada la importante extensión areal de estos sedimentos en gran parte del país, y tomando en cuenta numerosos ensayos en varias zonas, se puede definir como materiales muy finos, pasando un 93 % en el tamiz N° 200. A su vez el comportamiento plástico de estos sedimentos es variable, según el grado de humedad presente, pero se ha determinado que el Límite Líquido varía entre 30 a 80 %, y entre un 20 a 55 % para el Índice Plástico. De forma general estos materiales se clasifican como A-7-6 en la categorización A.A.S.H.T.O y como CH (arcilla de alta plasticidad) y CL (arcillas de baja plasticidad) en el Sistema Unificado. El tramo más superficial, puede hallarse ligeramente endurecido por la consolidación que producen fenómenos periódicos de humedad-sequedad. El Nspt para estos sedimentos, va desde 8 a 35, según la humedad contenida. Un ensayo realizado en la sede del CURE, ubicado al sur de la ciudad, arrojó un valor Nspt = 22, a una profundidad de 1 m, resultando la resistencia a la compresión simple en 2,75 kg/cm<sup>2</sup>. Estos materiales están en contacto directo con la roca, y en algunas partes aparecen mezclados con la alteración saprolítica típica de la roca. Se observaron profundidades máximas de 3,5 metros, con una mínima de 0,80 metros, para estos sedimentos arcillo-limosos. Sobre esta unidad hay dos tipos de recubrimientos de suelos orgánicos, que por su potencia y exposición topográfica, se decidió dividirlos en suelos poco profundos o someros y en suelos profundos. Los suelos someros, corresponde a profundidades de hasta 0,60 m de espesor y los suelos profundos hasta 1,8 m de potencia. Los suelos profundos se encuentran en zonas topográficas bajas o asociados a los cursos de agua.

Un segundo tipo de material no consolidado, es el que está compuesto por limo arenoso, de color gris oscuro, que localmente pasa a arenas cuarzosas finas, con 5 % de arena cuarzo gruesa. Este tipo de material fue observado en la zona de contacto o transición entre las milonitas y el gneis, conformando un paquete de poco espesor y están directamente apoyadas en las milonitas y gneises, y en algunos puntos sobreyacen a este tipo de roca alterada. Por su ubicación topográfica y de ambiente litológico, se deduce que pueden corresponder a alteración en zonas de cizallamiento. Debido a su reciente descubrimiento, y que la zona se encuentra edificada (zona céntrica de la ciudad), no se conocen particularidades geotécnicas, a excepción de que son materiales muy permeables, con importante circulación de aguas.

Las potencias observadas en estos materiales, va desde 0,9 a 2,2 metros.

Y un tercer tipo de material sedimentario, que se clasificó como arenas sueltas y limos recientes, resultado de las inundaciones del río, acumuladas en terrazas. Topográficamente, la confluencia del Arroyo Yermal con el río Olimar, generan una gran llanura aluvial. Se trata de arenas finas, cuarzo feldespáticas, de granos ligeramente redondeados, intercalados con limos de colores claros, a veces arcillosos, sedimentación típica de terrazas de inundación. Las potencias detectadas en pozos semi-surgentes, alcanzan 9 m de profundidad máxima, en áreas próximas al núcleo urbano y se midió una profundidad mínima de 0.60 metros al borde sur de la ciudad, en contacto con las milonitas. Esta unidad está constituida en su mayoría por arenas clasificables como SP y SM según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ya que más del 70 % pasa el tamiz N°4. Recubriendo estos materiales, pueden aparecer suelos de hasta 0,50 m e incluso pueden detectarse niveles de paleosuelos intercalados con las arenas.

#### Excavabilidad

Todos los materiales comprendidos en las unidades no consolidadas, se manifiestan como fácilmente excavables (clasificación E1), y muy puntualmente, y debido al endurecimiento por sequías, en algún sector puede clasificarse como E2.

Dadas las características geotécnicas presentes para estos materiales, el espesor y su disposición, los mismos pueden ser excavados a pico y pala o mecánicamente hasta el techo de roca.

#### Hidrogeología

Para el caso de la unidad arcillo limoso, el agua es prácticamente nula, y no afecta para nada el desarrollo de trabajos, incluso en varios días si no se producen precipitaciones. Un ensayo de Lefranc realizado en predio de la sede universitaria arrojó un resultado de  $k = 7 \times 10^{-5}$  cm/s, deduciéndose una baja permeabilidad.

En el caso del limo arenoso, se constata presencia de agua correspondiente al nivel freático, que incluso puede llegar a inundar la excavación en un período de varias horas. Las construcciones realizadas en este tipo de material, presentan grandes problemas de humedad. Durante el primer poblamiento del lugar, este tipo de sedimentos, se utilizó para construir pozos o cachimbas, las cuales proveían agua a los lugareños, y aún hoy día, hay casas que conservan estas construcciones.

Para los sedimentos en las terrazas aluviales, el nivel freático se sitúa muy próximo a la superficie, lo que provoca que las excavaciones se inundan en pocas horas. En los niveles arenosos, se observa la presencia de agua de forma casi instantánea al momento de realizar la excavación. Esto representa una gran dificultad al ejecutar los trabajos, ya que es necesario disminuir el nivel del agua, para poder instalar los materiales de construcción. Las aguas corresponden a aguas dulces de escorrentía de lluvias o de la propia anegación del Río Olimar.

#### Zonas de suelos antrópicos

En el estudio se han detectado dos zonas con relleno antrópico, es decir que fueron producto de la acción del hombre. Estas zonas fueron detectadas por las observaciones realizadas en fotografías aéreas de la década de los años 60, y correlacionadas a imágenes actuales. Corresponden a antiguas canteras, utilizadas en la construcción de las propias calles y edificaciones de la ciudad, en los inicios de desarrollo urbano. De acuerdo a relatos de vecinos, la cantera ubicada, actualmente al norte de

la ciudad, fue utilizada como vertedero municipal de residuos sólidos. Hoy día, estas áreas están ocupadas por construcciones o predios industriales.

## RESULTADOS

El presente trabajo propone una innovadora metodología para el conocimiento de los materiales subsuperficiales de Uruguay. Los resultados informados aquí se basan en una combinación de mapeo clásico con técnicas y tecnologías SIG, de fácil desarrollo y manejo, articulando con nuevas tecnologías.

El procedimiento cartográfico seguido generó un mapa geotécnico para la zona de estudio y produjo información inédita en este ámbito para la localidad de Treinta y Tres.

Este mapa geotécnico es una herramienta suficientemente efectiva, económica y precisa para toma de decisiones iniciales con respecto a proyectos de ingeniería en el área urbana de la ciudad, además de permitir una mejor gestión en la planificación de infraestructuras o cualquier espacio natural del área.

Tener conocimiento de los materiales sobre los cuales vamos a construir, nos da la posibilidad de gestionar la futura actividad humana en la ciudad.

Con esta cartografía, se facilita la demarcación de áreas a las cuales se deben aplicar limitaciones y recomendaciones sobre las actividades de construcción.

El mapa geotécnico (Figura 3), también puede ser usado mediante el Google Earth. El Qgis se puede sincronizar con Google Earth, visualizando imágenes a través de Open Layers Plugin o transferir un archivo .kml desde Qgis a Google Earth, por lo que resulta una manera simple de visualizar cualquier capa del mapa geotécnico creado.

**Tabla 1. Clasificación de unidades geotécnicas en el área de Treinta y Tres.**

Unidad geotécnica	Caract. Geológica	Hidrogeología	Excavabilidad
Unidad no consolidada	Arenas y limos recientes	Alta permeabilidad	E1
Unidad no consolidada	Arcillo limosa con suelo profundo	Baja a media permeabilidad	E1
Unidad no consolidada	Arcillo limosa con suelo somero	Muy baja permeabilidad	E1/E2
Unidad no consolidada	Limo arenoso	Permeabilidad media alta	E1
Unidad rocosa	Milonitas y Basaltos	Baja permeabilidad. Zonas alteradas o fracturas	E3

## RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS Y CONCLUSIONES

Es un trabajo que aplica en toda obra lineal de servicios enterrados, ya sean colectores de saneamiento, redes eléctricas, fibra óptica, servicios de agua potable, etc., o de referencia donde se requieran estudios geotécnicos para garantizar la viabilidad y seguridad del proyecto, asegurando la accesibilidad, el grado de excavabilidad de los terrenos, la estabilidad de las zanjas y agresividad de las aguas subterráneas. Las condiciones de cimentación son diferentes, según a que unidad geotécnica corresponda.

Para el caso de los sedimentos arenosos, en zonas próximas al Río Olimar se recomienda que las excavaciones no estén

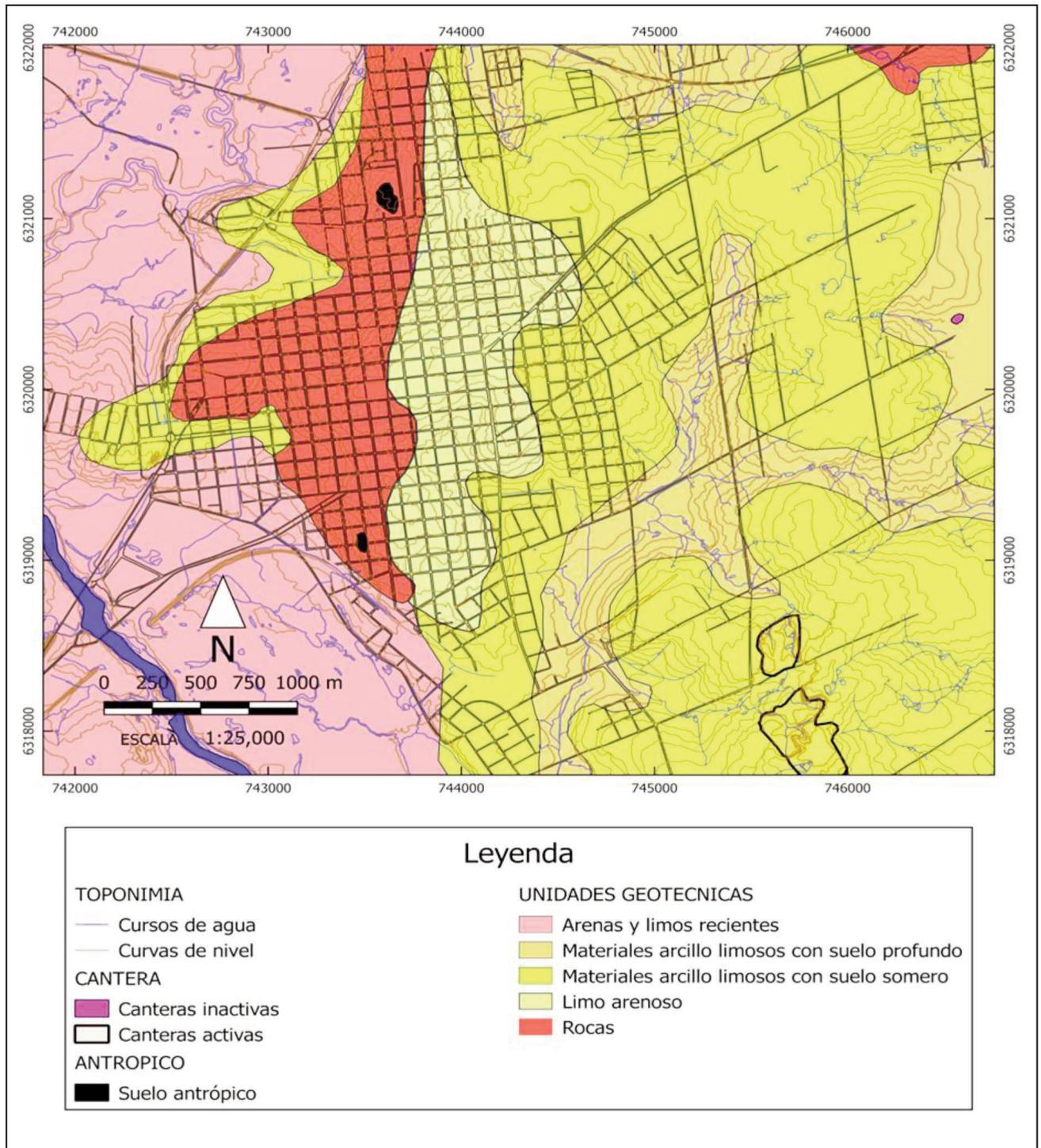


Figura 3. Mapa geotécnico de la ciudad de Treinta y Tres.

largo periodo de tiempo abiertas, ya que son inestables y su inundación provoca derrumbes.

Para el caso de construcciones de viviendas en general el terreno no ofrece grandes inconvenientes, siempre situando excavaciones en 1 a 2 metros de profundidad, con respecto a la rasante (superficie). Las unidades no consolidadas compuestas por sedimentos arcillo-limosos, son aptas para la fundación de estructuras pequeñas, como viviendas, utilizando cimentaciones directas o pilotes. En las zonas con suelo profundo, se debe

restringir las edificaciones, por un lado por el tipo de material no adecuado para tal fin y por otro, evitar el riesgo de inundaciones periódicas en épocas de lluvias o crecidas de los cauces de agua, ya que la topografía es muy baja. En estos lugares se ha observado importantes arrastres de materiales en días de lluvias copiosas.

Si las obras deben realizarse en unidades rocosas, se debe pensar en la utilización de maquinaria adecuada a tal fin, y son aptas para fundar cualquier tipo de construcción.

La unidad geotécnica limo arenoso, presenta un comportamiento hidrológico diferente, con circulación de aguas freáticas, lo que provoca humedades en las paredes de las construcciones antiguas, que están fundadas sobre cimentaciones directas o vigas de hormigón. La construcción en este tipo de unidad, debe de analizar elementos de albañilería anti-humedad.

Para el caso de construcción de calles y caminería en general, los materiales de superficie tienen poca compactación, por lo que se recomienda compactar, sustituir por otro material o retirar enteramente la capa de suelo vegetal.

Como resultado final de este estudio, se obtiene un mapa geotécnico, que contribuye al mejoramiento en la planificación de obras sobre la base del conocimiento del terreno y al ordenamiento territorial y urbanístico de la ciudad.

Finalmente, se debe mencionar que este tipo de cartografía se debe tomar como referencia general, y para trabajos más precisos se debe complementar con estudios geotécnicos más exhaustivos.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1993).  
Design of Pile Foundations Handbook. Federal Highway Administration (1993).  
*Soils and Foundations, Workshop Manual, second edition, Publication No. FHWA HI-88-009, Washington, D.C.*
- AMORIM, A. S. F. 2004.  
Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC - PE). 244p.  
*Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Ciência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.*
- BOSSI, J., FERRANDO, L., MONTAÑA, J., CAMPAL, N., MORALES, H., GANCIO, F., SCHIPILOV, A., PIÑEYRO, D., SPRECHMANN, P., 1998B.  
Carta geológica del Uruguay. Escala 1:500.000.  
*Geoditores, Montevideo.*
- BOSSI, J. & SCHIPILOV, A. 2007.  
Grupo Lascano: Formación Mariscal.  
*En: Bossi, J. Schipilov, A (Editores): Rocas ígneas básicas del Uruguay - Facultad de Agronomía Universidad de la República, pp. 99 -104, Montevideo.*
- CFEM (2006),  
Canadian Foundation Engineering Manual, 4th Edition,  
*Canadian Geotechnical Society, Richmond, British Columbia.*
- DINIZ, N. C. ET AL. 2001.  
Carta geotécnica de Manaus como resultado de parceria institucional.  
*In: Simposio Nacional de Cartografia Geotécnica, 2001, Brasília. Anais ABGE p 15.*
- GAUCHER, C. 2014.  
Terreno Cuchilla Dionisio: Bloque septentrional.  
*En: Bossi, J. & Gaucher, C. (Editores): Geología del Uruguay - Tomo 1: Predevónico, pp.377 - 400, Montevideo.*
- GONZALEZ DE VALLEJO, L., FERRER, L., ORTUÑO, L., OTEO, C., 2002.  
Ingeniería Geológica.  
*Editorial Pearson-Prentice Hall- Madrid, España, 744 pp.*
- GOMEZ RIFAS, C. 1995.  
A zona de cizalhamento sinistral de Sierra Ballena no Uruguai.  
*Tesis Doctoral, Instituto de Geociencias, Universidade de Sao Paulo, 244 pp.*
- GOSO, E. 2016.  
Estudio Geotécnico Predio ubicado en Isla de Flores 1720. Padrones 2.143 y 35.460 Barrio Sur, Departamento de Montevideo, Uruguay.
- GOSO, H; NAHOUM, B; GOSO, C; MEZZANO, A; ROSTÁN, A. (1997).  
Carta Geotécnica de la Región Metropolitana de Montevideo, a escala 1:100.000.  
*Memoria explicativa. Departamento de Geotécnica, Instituto de Estructuras y Transporte "Prof. Julio Ricaldoni". Oficina de Publicaciones, Centro de Estudiantes de Ingeniería. 38 pp., Montevideo, Uruguay.*
- IAEG, 1981.  
Rock and soils description and classification for engineering geological mapping.  
*Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. Bulletin of the IAEG, n° 24, pp. 235-274.*
- LEMAC, LABORATORIO DE ENSAYOS. 2015.  
Estudio geotécnico CURE, sede Treinta y Tres, Paraje Olimar Grande, Departamento de Treinta y Tres.  
*Informe 2015/029.*

LOPEZ MARINAS, J.M. 2000.

Geología aplicada a la Ingeniería Civil.

*Inversiones editoriales Dossat.*

MARTINEZ LARGO, J.A. 2014.

Desarrollo de una base de datos geológico-geotécnico en la ciudad de Gijón y su implementación en un SIG.

*Tesis de fin de Máster (inédita), Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 79 pp.*





# Geología aplicada a la detección de la fuente de filtraciones en la Boca II del túnel de aducción del complejo hidroeléctrico Futaleufú, provincia de Chubut

## Geology applied to the detection of seepage source at Boca II, adduction tunnel of Futaleufú hydroelectric complex, Chubut

Celli, Alejandro E. <sup>1</sup> ✉ - Reynal, Héctor R. <sup>2</sup>

Recibido: 24 de junio de 2018 • Aceptado: 11 de diciembre de 2018

### Resumen

*Ubicada en el Parque Nacional Los Alerces, Futaleufú es una presa de materiales sueltos con núcleo arcilloso de 120 m de altura, cuyos principales objetivos son la generación hidroeléctrica y la regulación de crecidas. Una de las más notables particularidades de este conjunto de obras, es el puente tubería, de 8,50 m de diámetro, que atraviesa un valle glaciar de unos 450 m de extensión, conectando la Boca II con la Boca III de la tubería de aducción, que transporta el agua a presión desde la obra de toma, en el embalse, hasta la central hidroeléctrica, ubicada a unos 2000 m aguas abajo, con un desnivel vertical de unos 120 m (Figura 1).*

*Como en toda obra hidráulica, es frecuente la existencia de pequeñas filtraciones, debido a la imposibilidad práctica de alcanzar un sistema perfectamente estanco.*

*En el sector de la Boca II, las filtraciones observadas sobre la ladera que conecta el túnel con el puente tubería, fueron registrando un leve, pero sostenido incremento durante una década, sin tener certezas sobre la procedencia del agua infiltrada.*

*Hacia fines de 2013, se comenzaron a analizar diferentes hipótesis, determinando tres posibles alternativas: a) las filtraciones provenían de las precipitaciones, percolando localmente a través de las fisuras del macizo rocoso; b) provenían del embalse, atravesando, a lo largo de unos 600 m, el tortuoso sistema de discontinuidades del macizo rocoso, compuesto por tobos y andesitas brechosas; o c) filtraba a través del túnel de aducción, revestido con 40 cm de hormigón, y en parte blindado con la tubería de acero del puente acueducto.*

*Para dilucidar la incógnita sobre el área de aporte, se contó con distintos elementos de auscultación, que brindaron datos sobre: niveles de embalse; precipitaciones; 4 puntos de aforo de las filtraciones; análisis de calidad de aguas en el embalse y en uno de los afloramientos (Pujol et al., 2013). A su vez, se recolectaron y analizaron antecedentes geológicos generales de la zona de*

1. Organismo Regulador de Seguridad de Presas

✉ acelli@orsep.gob.ar

2. Consultor independiente

obras, y del sector de interés en particular, provenientes de los estudios de anteproyecto, elaborados por Agua y Energía Eléctrica S.E. (Lanyi, 1972a, b). Finalmente, se llevó a cabo una visita al sitio, donde se caracterizó la configuración geológica superficial del área de interés.

A partir del análisis de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, y sus relaciones con los factores hidrometeorológicos e hidroquímicos, se arribó a un área de aporte teórica, que pudo ser confirmada, unos meses más tarde, durante las tareas de mantenimiento generalizado programadas por la concesionaria, efectuadas en marzo de 2014. Estas tareas incluyeron la salida de servicio de la central y la reducción del embalse a su nivel mínimo, a fin de permitir el ingreso a los distintos sectores habitualmente inundados. Vale mencionar que esta operación se realiza, en promedio, cada 10 años, por lo que constituye una oportunidad invaluable para inspeccionar el estado de los diferentes sectores en forma directa.

De esta manera, se logró resolver una incógnita mantenida durante años, a partir del análisis conjunto de dos disciplinas que se complementan naturalmente: la geología aplicada y la ingeniería civil.

**Palabras clave:** Presa Futaleufú - Filtraciones - Túnel - Auscultación - Geología.

## Abstract

Located in Los Alerces National Park, Futaleufú is a 120 m height embankment dam, whose main objectives are hydropower and flood regulation. One of the most remarkable features of this set of works, is the pipeline bridge, with a diameter of 8.5 m, which crosses a glacial valley of about 450 m in length, connecting Boca II with Boca III of the adduction pipeline, transporting water under pressure, from the intake located in the reservoir, to the hydroelectric plant, located about 2000 m downstream, with a vertical drop of about 120 m (Figure 1).

As in every hydraulic work, the existence of minor seepage is frequent, due to the practical impossibility of reaching a perfectly watertight system.

At the Boca II sector, on the slope that connects the tunnel with the pipe bridge, the observed seepage has been registering a slight, but sustained increase during a decade, without certainties about the origin of the leaked water.

At the end of 2013, different hypotheses began to be analyzed, defining three possible alternatives: a) the filtrations came from the precipitations, percolating locally through the rock mass joints; b) they came from the reservoir, crossing through the 600 m length tortuous system of discontinuities that integrate the tuff and brecciated andesite rock mass; or c) the water percolated through the adduction tunnel, covered with 40 cm of concrete, and partly blinded with the steel pipe of the aqueduct bridge.

To elucidate the unknown on the contribution area, different auscultation elements were considered, providing data on: reservoir levels; precipitations; 4 points of seepage gauging measures; water quality analysis from the reservoir and from one of the gauges (Pujol et al., 2013). Additionally, general geological backgrounds of the area of works, and particularly of the sector of interest were gathered and analyzed, from the studies of Agua y Energía Eléctrica S.E. (Lanyi, 1972a, b). Finally, a visit to the site was carried out, where the surface geological configuration of the area of interest was characterized.

Based on the analysis of the geological, geotechnical and hydrogeological conditions, added to their relationships with hydrometeorological and hydrochemical factors, it has been arrived at a theoretical contribution area, which could be confirmed, a few months later, during the generalized maintenance tasks programmed by the concessionaire, carried out in March 2014. These tasks included the power plant shutdown and the reduction of the reservoir to its minimum level, in order to allow entry to the different sectors usually flooded. It is worth mentioning that this operation is performed, on average, every 10 years, which implies an invaluable opportunity to inspect the operation of the different sectors directly.

From this analysis, it was possible to solve an unknown maintained for years, from the joint analysis of two disciplines that complement each other naturally: applied geology and civil engineering.

**Keywords:** Futaleufú Dam - Seepage - Tunnel - Auscultation - Geology.

## INTRODUCCIÓN

La presa General San Martín, más conocida como Futaleufú, nombre del complejo hidroeléctrico del que forma parte, se emplaza sobre la cuenca del río Futaleufú, de 300 m<sup>3</sup>/s de caudal módulo y vertiente pacífica, en su paso por el Parque Nacional Los Alerces, a unos 20 km de la localidad de Trevelin, en la provincia de Chubut. Se trata de una presa de materiales sueltos con núcleo arcilloso, de 120 m de altura y 600 m de longitud de coronamiento, con una capacidad de embalse de 5400 Hm<sup>3</sup>. El complejo fue construido en la década de 1970,

con el objetivo de generar energía y a la vez proteger de las recurrentes crecidas del río a las localidades emplazadas aguas abajo.

La central hidroeléctrica se encuentra ubicada a unos 2.000 m de la obra de toma, con un resalto topográfico de 120 m. El sistema de aducción, que conecta ambas estructuras, presenta un particular diseño, representado por un túnel interrumpido por un valle de origen glaciario, que es salvado por un puente tubería colgante de 8,50 m de diámetro y unos 450 m de longitud (Figura 1). Esta estructura descansa sobre una

pila central, fundada a su vez sobre un anillo de 491 pilotines, enclavados sobre el macizo rocoso de andesitas, brechas y tobas, ubicadas bajo el till de fondo que tapiza el valle.

La salida del primer tramo del túnel de aducción, que empalma con el puente tubería, se denomina Boca II. Se trata de una excavación llevada a cabo sobre un macizo rocoso de origen volcánico, representado por tobas y brechas andesíticas de la Formación Futaleufú, intruidas por diques basandesíticos. El talud excavado, presenta una elevada inclinación, lo que requirió la construcción de una estructura a dos aguas, denominada “La Capilla”, a fin de proteger la tubería de la posible caída de bloques (Figura 2).

En el sector de la Boca II se habían observado filtraciones, que parecían ir incrementándose con el paso del tiempo. Esto motivó la instalación, por parte de la empresa concesionaria, de una serie de aforadores de paso, a fin de establecer la cuantía de las mismas.

Paralelamente, comenzaron a evaluarse diferentes hipótesis, respecto del aparente aumento del caudal filtrante, arribando a tres posibles alternativas:

- a) las filtraciones provenían de las precipitaciones, percolando localmente a través de las fisuras del macizo rocoso;
- b) provenían del embalse, atravesando, a lo largo de unos 600 m, el tortuoso sistema de discontinuidades del macizo rocoso, compuesto por tobas y andesitas brechosas;
- c) filtraba a través del túnel de aducción, revestido en 40 cm de hormigón, y en parte blindado con la tubería de acero del puente acueducto.

Para dilucidar esta incógnita, se requería primeramente cuantificar las filtraciones.

Los primeros datos con que se cuenta, datan del año 2004. Sin embargo, dado que las mediciones de 2005 y 2006 se encuentran incompletas, se ha decidido considerar para el análisis, aquellos disponibles desde 2007, con una frecuencia de medición semanal.

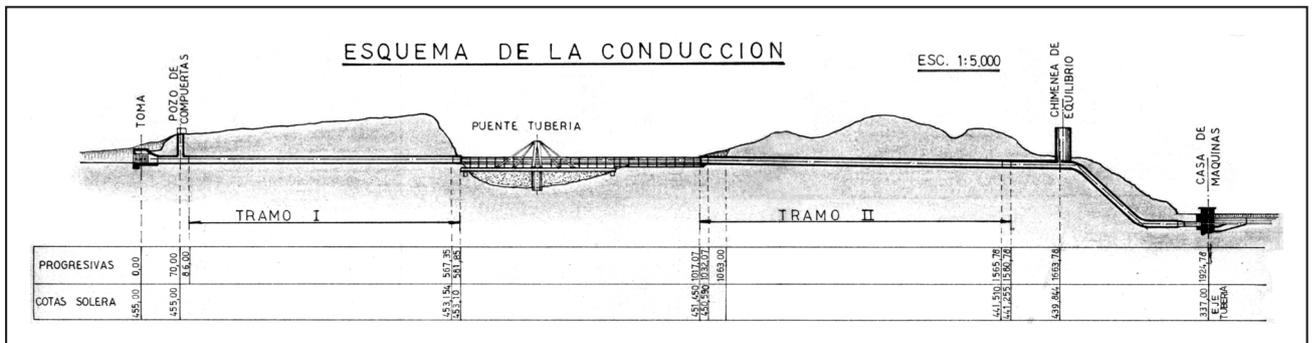


Figura 1. Esquema del túnel de aducción del Complejo Futaleufú, que conecta el embalse con la casa de máquinas, atravesando el macizo rocoso de la Formación Futaleufú, interrumpido por un valle glaciario, que es salvado por medio de una tubería colgante. Tomado de Sander, 1973.



Figura 2. Boca II del túnel de aducción, protegida por “La Capilla”, y comienzo del puente tubería.

En la Figura 3 se presenta un croquis con la distribución de los 4 aforadores, ubicados en torno a la Boca II. El aforador 1 recoge las filtraciones provenientes del túnel de inspección y los alrededores de la puerta estanca. El aforador 2, recibe las pérdidas del anterior, sumadas a las filtraciones provenientes del sector

## EVOLUCIÓN DE LAS FILTRACIONES

Las filtraciones detectadas en la zona de la Boca II, han sido medidas semanalmente por personal de la concesionaria, a partir de los aforadores de paso denominados 1, 2, 3 y 6 (Figura 4). Para el análisis de su evolución, se cuenta con datos confiables de los tres primeros aforadores, en el intervalo del 1º de febrero de 2007 hasta el 26 de septiembre de 2013; mientras que para el aforador 6, se dispone de mediciones desde el 1º de junio de 2011, hasta la misma fecha. A su vez, se cuenta con mediciones del nivel del embalse para el intervalo completo, y de precipitaciones, a partir del 22 de enero de 2009.



Figura 4. Detalle del Aforador 2, ubicado en el sector sur de la Capilla.

En la Figura 5 se presentan los datos correspondientes a las mediciones obtenidas en el intervalo temporal febrero 2007 - septiembre 2013. A fin de facilitar la comparación entre los datos, se expresa el nivel del embalse con un plano de referencia de 470 msnm. Por igual motivo, se presentan los datos de precipitaciones como 5 veces los valores medidos, sobre la media del período considerado.

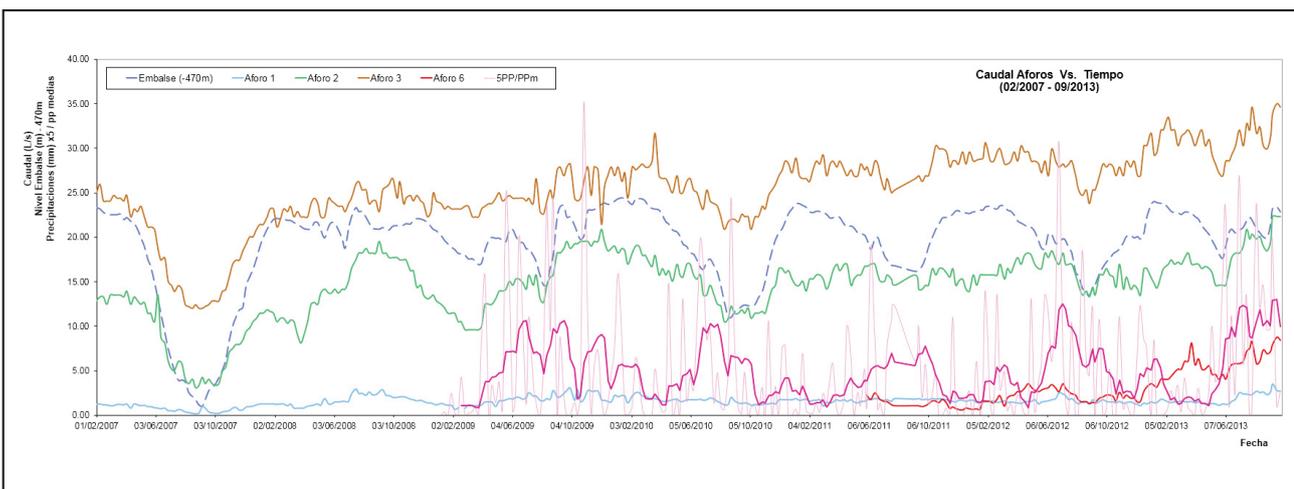


Figura 5. Registro de caudales aforados en relación con el nivel de embalse y las precipitaciones, desde el 01/02/2007 hasta el 26/09/2013, con frecuencia de medición semanal. En línea cortada de color azul, el nivel del embalse, en metros [el 0 corresponde a 470 msnm]. En celeste, los caudales registrados en el Aforador 1, en litros sobre segundo. En verde, los mismos datos provenientes del Aforador 2. En marrón, el Aforador 3. En rojo, el Aforador 6, operando desde el 01/06/2011. En rosa, los datos de precipitaciones. Para una mejor visualización, se ha considerado una relación de 5 veces respecto de la precipitación media del período considerado; y en trazo más grueso, la media móvil.

Del análisis de la Figura 5, se desprende que los niveles del embalse y las precipitaciones presentan variaciones cíclicas, no coincidentes en el tiempo. Esto se debe fundamentalmente al criterio de operación del embalse.

Se observa a su vez, que los caudales medidos en el aforador 1 parecen mantenerse aproximadamente constantes. Este instrumento capta mayormente las filtraciones provenientes de la compuerta de acceso al túnel de inspección.

Por su parte, los caudales registrados en los aforadores 2, 3 y 6, parecen guardar una correspondencia instantánea con los niveles del embalse, con leves variaciones, que podrían ser asignadas a las precipitaciones, con un cierto desfasaje en el tiempo, que podría adjudicarse a la baja conductividad hidráulica del macizo rocoso.

Si bien es apreciable la dependencia, se evidencia también una tendencia al incremento de los caudales medidos en los aforadores 2, 3 y 6.

En la Figura 6, se representa el grado de correlación entre el nivel del embalse y los caudales registrados en los aforadores. Como puede visualizarse, no parece haber una influencia sensible del nivel del embalse en los registros del aforador 1. Sin embargo, se aprecia una tendencia a la linealidad positiva en los aforadores 2, 3 y 6, con un cierto grado de dispersión, que podría corresponderse a la influencia de las precipitaciones, o bien al incremento de las filtraciones en el tiempo.

A fin de delimitar ambas influencias en los valores registrados, se exponen en la Figura 7, por un lado, las relaciones entre los caudales aforados y el nivel del embalse, en función del tiempo; y por otra parte, los valores de precipitaciones en relación con la media, expresados como la centésima parte, a fin de establecer una mejor visualización.

De esta manera, se confirma por un lado la tendencia al incremento en las filtraciones captadas por los aforadores 2, 3 y 6 en relación con el nivel del embalse. La relación con las precipitaciones no parece tan clara, y se estima que podría ser responsable de variaciones menores.

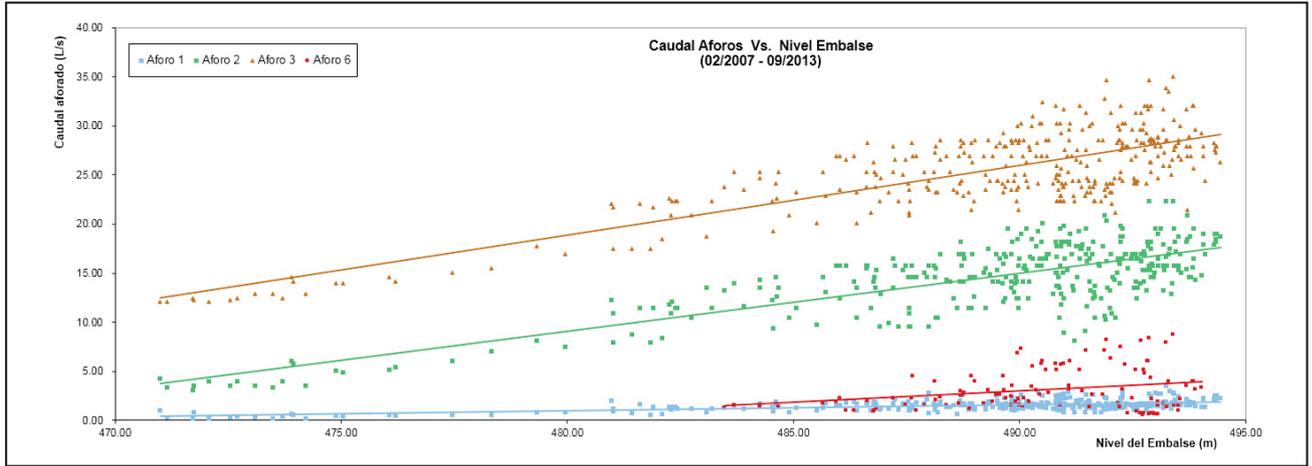


Figura 6. Relación entre los caudales medidos en los aforadores 1, 2, 3 y 6, y el nivel del embalse, para el período 02/2007 a 09/2013.

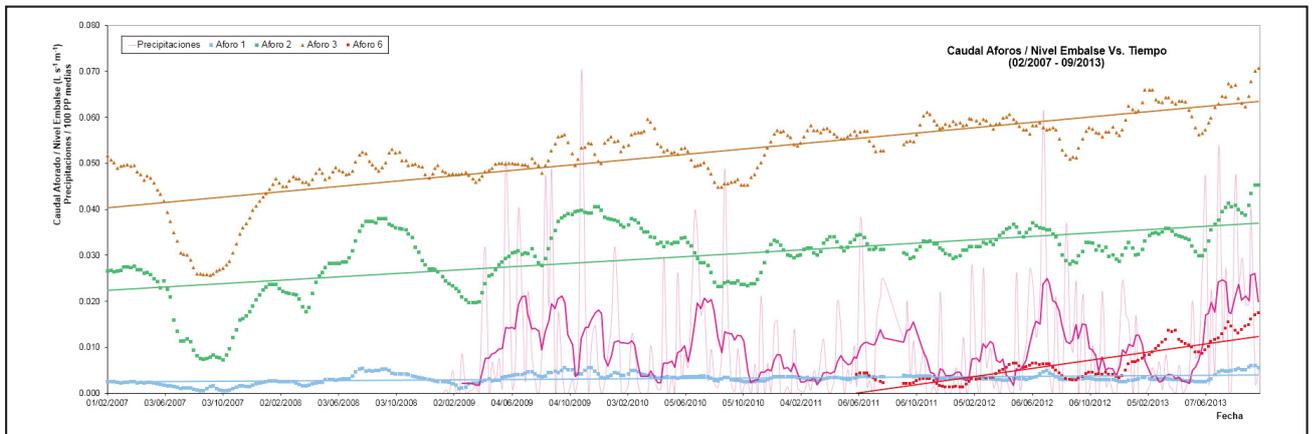


Figura 7. Relación temporal entre los caudales aforados y el nivel del embalse. En rosa, las precipitaciones, expresadas como la centésima parte de su relación con la media del período analizado; y en trazo más grueso, la media móvil.

Para el caso del aforador 1, la tendencia general es a mantener un caudal de filtraciones constante. Cabe recordar que este aforador toma las filtraciones provenientes casi exclusivamente de la compuerta de acceso al túnel de inspección.

En las figuras 8, 9 y 10, se lleva a cabo el mismo análisis, pero aumentando el grado de detalle en el intervalo de los últimos 2 años, desde el 22/09/2011 al 26/09/2013, en el cual se dispone de datos de todos los instrumentos contemplados.

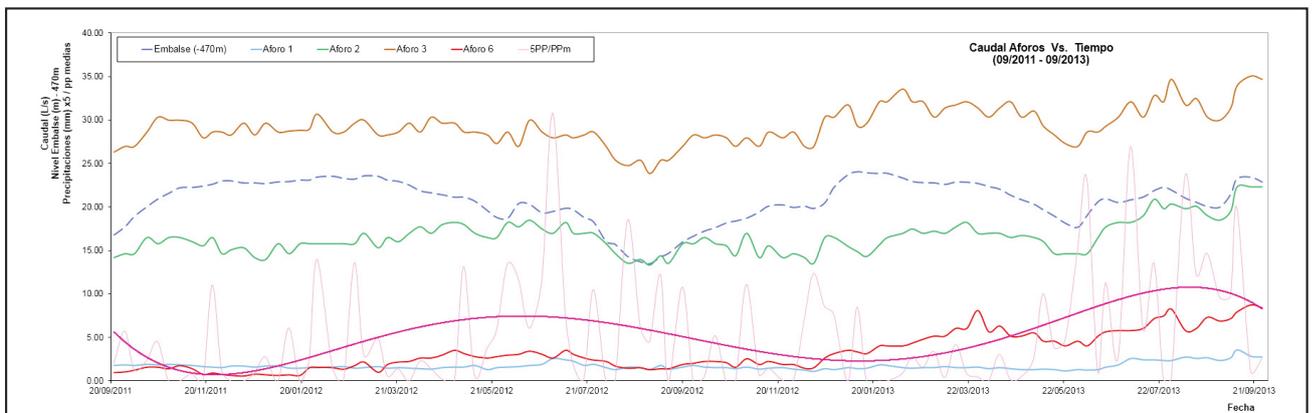


Figura 8. Caudales captados por los aforos en relación con el nivel de embalse y las precipitaciones, desde el 22/09/2011 hasta el 26/09/2013, con frecuencia de medición semanal. En línea discontinua azul, el nivel del embalse, en metros (el 0 corresponde a 470 msnm). En celeste, los caudales registrados en el aforador 1, en litros sobre segundo. En verde, los mismos datos provenientes del Aforador 2. En marrón, el Aforador 3. En rojo, el Aforador 6. En rosa, los datos de precipitaciones. Para una mejor visualización, se ha considerado una relación de 5 veces respecto de la precipitación media del período considerado; y en trazo más grueso, su regresión polinómica.

Se puede constatar que, salvo para el aforador 1, que se mantiene constante, en los últimos dos años analizados, las filtraciones se han incrementado en forma lenta, pero sostenida, a una tasa marcada por la pendiente de las rectas de aproximadamente  $10^{-5}$ .

Confirmado el incremento sostenido de las filtraciones en la Boca II, y con la evidencia de una dependencia con el nivel del embalse, y una relación no muy clara con las precipitaciones, se buscaron otras herramientas que posibiliten la determinación de las causas de tales incrementos.

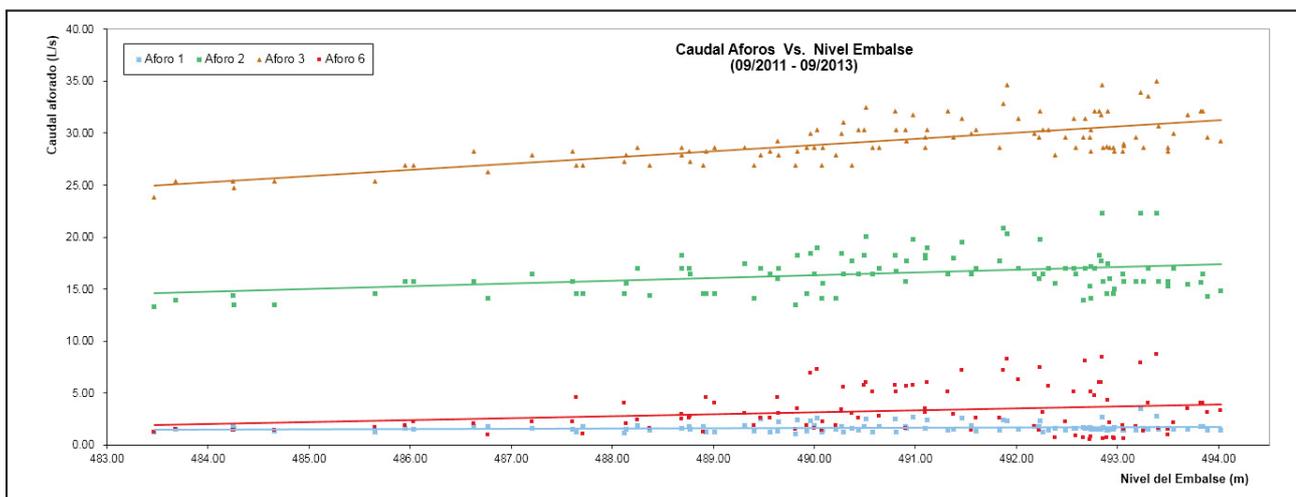


Figura 9. Relación entre los caudales medidos en los aforadores 1, 2, 3 y 6, y el nivel del embalse, para el período 09/2011 a 09/2013.

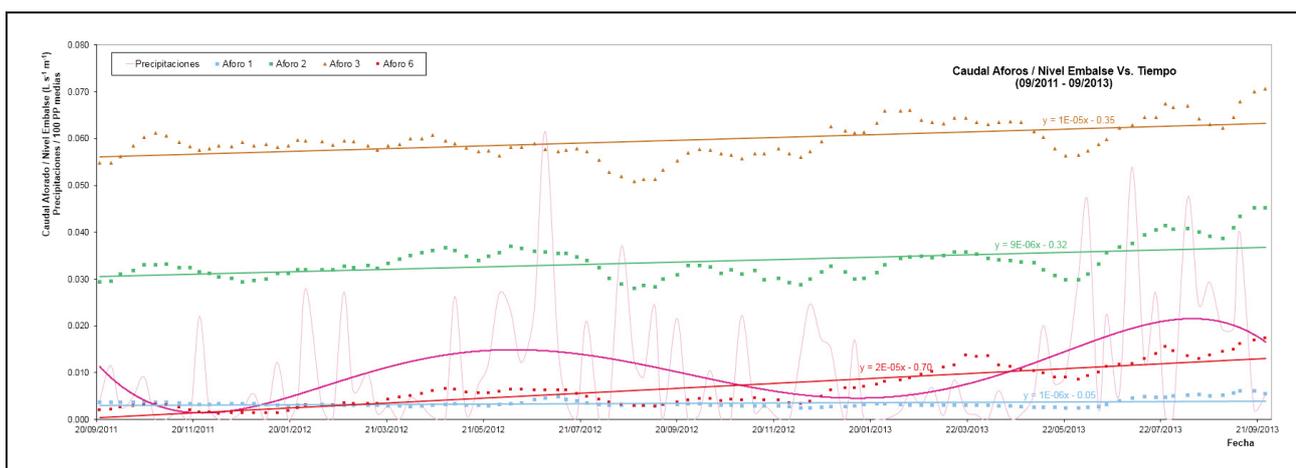


Figura 10. Relación temporal entre los caudales aforados y el nivel del embalse. En rosa, las precipitaciones, expresadas como la centésima parte de su relación con la media del período analizado; y en trazo más grueso, su regresión polinómica. Período analizado: 09/2011 a 09/2013.

### HIDROQUÍMICA

A fin de arrojar luz sobre la procedencia de las filtraciones, se colectaron muestras de agua del aforador 2 y del embalse, contrastando los valores obtenidos.

En la Tabla 1, se observan los resultados de los análisis hidroquímicos efectuados sobre 7 muestras de cada fuente, obtenidas con una frecuencia de unos 6 meses. Como puede apreciarse, se evidencia una similitud en los valores del agua colectada en ambas fuentes.

Se estima que estas similitudes no serían tan marcadas, en el caso de que el agua del aforador 2 tuviese que atravesar el macizo rocoso desde el embalse hasta la Boca II, con el consecuente incremento en los valores de parámetros tales como la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales.

A partir de este análisis, se descarta la hipótesis de aporte directo desde el embalse, atravesando los 600 metros de macizo rocoso fisurado. Los datos hidroquímicos refuerzan el hecho de que no existe un desfase temporal entre los cambios en el nivel del embalse y las variaciones en los caudales filtrados (figuras 5 y 8). Este hecho solo sería posible con una permeabilidad extremadamente elevada del macizo rocoso.

Considerando además que la relación de los caudales aforados con el nivel del embalse parece ser de mayor importancia que la de las precipitaciones, al menos para el último período analizado (figuras 9 y 10), es razonable suponer que la hipótesis de fisuras en el túnel de aducción sería la de mayor sustento.

Por su parte, la relación instantánea con el nivel del embalse, induce a pensar en una mínima percolación a través del macizo rocoso.

Tabla 1. Análisis hidroquímicos efectuados a partir de muestras colectadas en el embalse y en el aforador 2. Extraído de Pujol et al. (2013).

Embalse Presa		23/06/2009	07/12/2009	03/01/2011	21/06/2001	12/12/2011	28/06/2012	26/12/2012	Unidades
Parámetros	Temperatura	8	7	12	7	10	6	11	°C
	pH	6.9	7.8	8.1	8.2	7.7	8.3	7.4	-
	Conductividad Eléctrica	45	56	46	52	41	68	44	( $\mu$ S/cm)
	Sólidos Disueltos Totales	35	47	35	41	33	50	28	(mg/l)
	Alcalinidad Total	15	19	10	13	13	15	10	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Carbonatos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Bicarbonatos	15	19	10	13	13	15	10	(mgCaCo3/l)
	Dureza	14	15	12	25	7	27	21	(mgCaCo3/l)
	Cloruros	<1	<1	13	<1	2	10	5	(mg/l)
	Sulfatos	<1	4	8	<1	<1	4	2	(mg/l)
	Hierro	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02	<0.01	(mg/l)
	Amonio	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)
	Nitritos	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)

Puente Tubería Boca II - Aforo 2		23/06/2009	04/12/2009	03/01/2011	21/06/2001	12/12/2011	28/06/2012	26/12/2012	Unidades
Parámetros	Temperatura	8	9	9	7	8	7	12	°C
	pH	6.7	7.8	8.0	8.1	7.8	8.4	7.5	-
	Conductividad Eléctrica	50	52	47	51	45	53	48	( $\mu$ S/cm)
	Sólidos Disueltos Totales	50	40	42	42	38	50	30	(mg/l)
	Alcalinidad Total	16	19	12	24	14	16	13	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Carbonatos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	(mgCaCo3/l)
	Alcalinidad de Bicarbonatos	16	19	12	24	14	16	13	(mgCaCo3/l)
	Dureza	22	18	15	19	10	23	19	(mgCaCo3/l)
	Cloruros	<1	<1	15	<1	<1	8	5	(mg/l)
	Sulfatos	<1	5	6	<1	<1	4	2	(mg/l)
	Hierro	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.03	<0.01	(mg/l)
	Amonio	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)
	Nitritos	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	(mg/l)

Por lo tanto, todo pareciera indicar que las filtraciones provienen de una fisuración en el túnel de aducción, próxima a la Boca II.

Para intentar establecer posibles puntos débiles del túnel, se acudió a los mapas geológicos de proyecto, localizados en el Archivo Técnico de la Secretaría de Energía de la Nación, donde se resguarda una importante colección de documentos pertenecientes a la ex Agua y Energía Eléctrica S.E.

### GEOLOGÍA DE LA BOCA II

La geología de este sector ha sido estudiada en detalle por los geólogos de Agua y Energía Eléctrica, particularmente por el Dr. Ladislao Lanyi (1972a, b), durante la ejecución del túnel de aducción.

El macizo rocoso donde se implanta la Boca II está comprendido por tobas y andesitas brechosas de la Formación

Futaleufú, con diverso grado de fracturación, con intrusiones de diques basandesíticos altamente fallados.

El rumbo general de la estructuración es Noroeste, con una suave inclinación de unos 10 a 12° hacia el Sudoeste. Todo el conjunto presenta por sectores una marcada erosión de origen glaciario.

Entre las progresivas 552 y 566 del túnel de aducción (ver Figura 11), Lanyi (1972b) describe la presencia de fallas de hasta 70 cm de espesor, con brechas y jaboncillo, en conjunto con una serie de diques andesíticos paralelos entre sí. Refiere a su vez, la existencia de un dique principal, con un espesor de 14 metros, orientado según un azimut de 15°, y una inclinación de 79° a 85° hacia el Este.

Hacia la progresiva 576, en la solera, describe un dique de unos 2 metros de espesor, de azimut 20°, e inclinación 72° al Este, con el contacto fallado y una zona brechada de 10 a 20

cm de espesor, con jaboncillo. Hacia la bóveda del túnel, este sector ha sido excavado y retirado.

A continuación, se transcribe el párrafo final de uno de los informes de Lanyi (1972b), que resume las condiciones geotécnicas del sitio:

“Considerando cuál zona del túnel es la más apropiada para fundar el apoyo del puente acueducto, se desprende que la más conveniente sería la comprendida hacia el oeste de la progresiva 550

dado que allí la roca es maciza y compacta, ya que la zona del dique está fallada y con importante zona brechada con arcilla, la cual podría sufrir desplazamientos en caso de sismos, lo que atentaría contra la estabilidad del puente.”

La Figura 11 corresponde a un perfil geológico de la salida del túnel de aducción en la zona de la Boca 2, con vista hacia el Norte, elaborado por Lanyi (1972b), en el cual se ha resaltado la zona del dique principal, anteriormente mencionado.

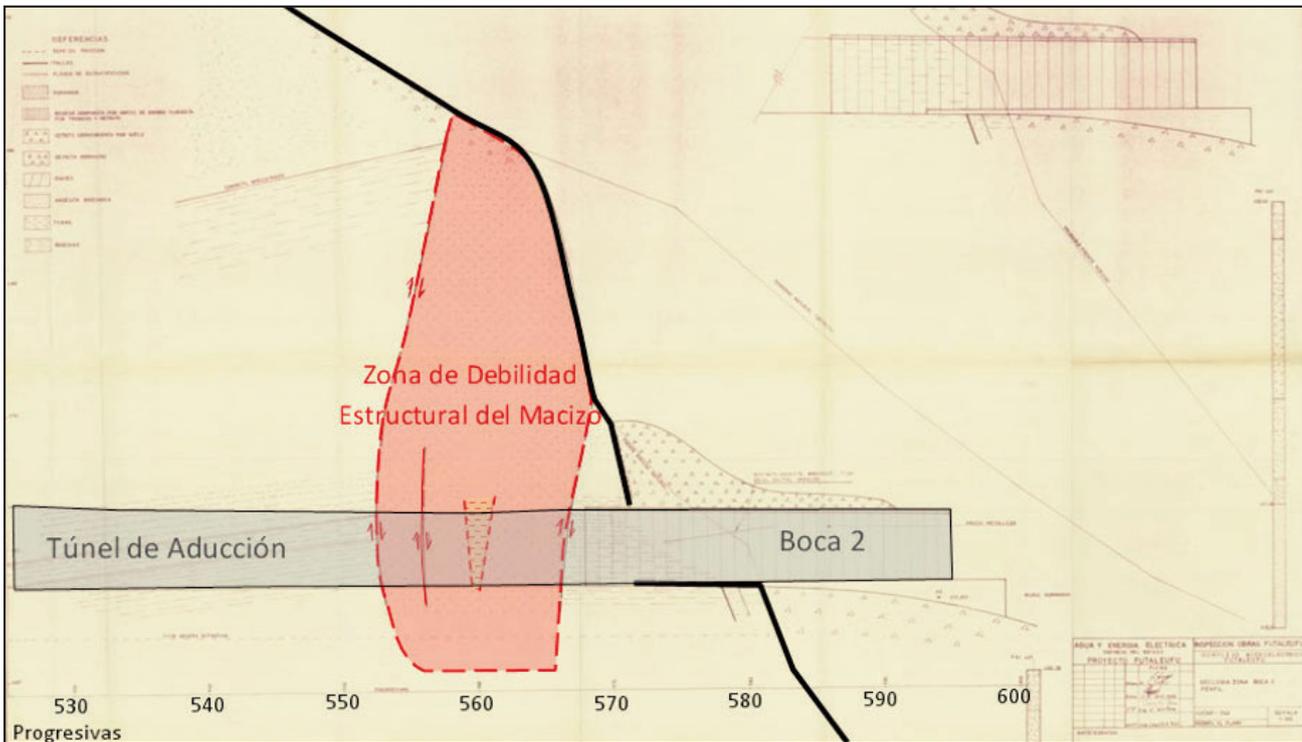


Figura 11. Perfil geológico de la zona de la Boca II (modificado de Lanyi, 1972b).

Considerando las observaciones de Lanyi sobre la configuración geológico - estructural de la zona de la Boca II, sumadas a los indicios previamente asumidos, en los cuales se ha considerado que los aportes a las filtraciones debían de provenir de una zona del túnel cercana a la Boca II, todo pareciera indicar que el problema radicaría en algún punto al este de la progresiva 550 m.

Si a esto se le suma el hecho de que las recomendaciones del Dr. Lanyi no habrían sido tenidas en cuenta al momento de la construcción, como así lo evidencian los probables planos conforme a obra, como el de la Figura 12, y el de la misma Figura 11, prácticamente no quedan dudas de que este sector es el comprometido. Solo resta identificar si se corresponde con un área puntual, o una zona de mayores dimensiones.

Ante la imposibilidad de ingresar al túnel de aducción con la central en servicio, se llevó a cabo una primera visita al sitio, a fin de observar desde la superficie, la configuración geológica del talud excavado. En las figuras 13, 14 y 15, se puede apreciar el estado general de fracturación y meteorización del macizo rocoso en el entorno de la Boca II. A su vez, se resaltan una serie de fallas, que podrían corresponderse con la zona identificada por Lanyi en la Figura 11.

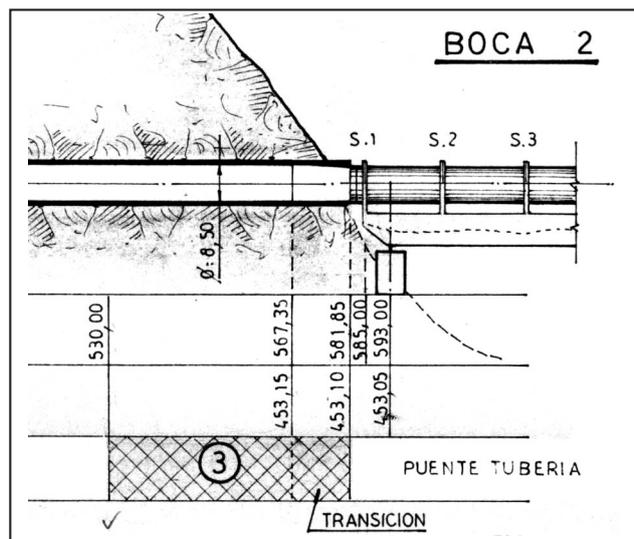


Figura 12. Detalle de la transición entre el túnel y el puente tubería, en la Boca II (extraído de Sander, 1973). Se observa que el puente comienza en la progresiva 581,85, existiendo una transición previa, desde la progresiva 567,35, un metro al este del límite de la zona de falla, la cual queda desprovista del blindaje de acero de la tubería.



Figura 13. Talud excavado, correspondiente a la Boca II del túnel de aducción. En líneas roja, se indican tres zonas de falla.



Figura 14. Detalle de la falla inferior, indicada en la Figura 13, sobre el acceso a la galería de inspección.



Figura 15. Sector norte de la Boca II. Se observa el elevado grado de fracturación y meteorización del macizo rocoso.

## INSPECCIÓN DEL TÚNEL DE ADUCCIÓN

Habiendo analizado los datos hidrológicos, hidroquímicos y geológicos, y luego de llevar a cabo un relevamiento expeditivo sobre el estado general del macizo rocoso, todo apuntaba a que el agua que circula a presión a través del túnel de aducción había generado una o más fisuras en el hormigón de 40 cm de espesor que lo reviste, en algún punto cercano a la Boca II. Este hecho, muy probablemente habría ocurrido en el tramo entre las progresivas 552 y 566, donde el macizo rocoso presenta una baja calidad geotécnica, y quizás el sostenimiento podría no haber sido ejecutado con la resistencia y ductilidad adecuada.

Aunque gozaba de un nutrido sustento técnico, esta hipótesis se mantuvo en el terreno de las especulaciones por algunos meses hasta que, en marzo de 2014, se dio un hecho de recurrencia decenaria: llegó el momento de las tareas de mantenimiento generalizado, programadas por la Concesionaria, las cuales incluyen la salida de servicio de la central, la reducción del nivel del embalse a su nivel mínimo, y la revisión de los sectores habitualmente inundados e inaccesibles.

El programa no tenía previsto realizar reparaciones específicamente dentro del túnel, aunque sí se había dispuesto sellar una serie de fisuras en las proximidades de la compuerta de acceso a la galería de inspección, que generaban las filtraciones colectadas por el aforador 1.

Independientemente de ello, era una oportunidad única para acceder al túnel de aducción, y así se hizo. Los autores del presente trabajo, en representación del ORSEP, suponían que las presuntas fisuras debían poder ser individualizadas a simple vista. Se sabía, sin embargo, que una cuestión física podría atentar contra su identificación, y es el hecho que al entrar en carga, el túnel tiende a expandirse radialmente, y las fisuras se abren; mientras que al vaciarse, tienden a cerrarse, pudiendo quedar ocultas a la vista.

Un primer hecho ocurrido al poco tiempo de deprimir al mínimo el nivel del embalse y vaciar el túnel, fue que desaparecieron las filtraciones; despejando así cualquier duda sobre su dependencia directa, y despreciando cualquier relación que pudiese haber con las precipitaciones o algún aporte freático local.

Cuando finalmente se logró acceder a este tramo del túnel, se constató un aspecto general muy bueno, con algunas fisuras menores en el hormigón. Sin embargo, llamó la atención el estado del revestimiento en el contacto con la tubería de acero, que conforma la transición hacia el puente tubería. Según el plano de la Figura 12, este punto correspondería a la progresiva 567, si bien existen dudas respecto de que aquel plano sea conforme a obra, por lo que podrían existir pequeñas diferencias, que podrían hacerlo coincidir en forma más o menos exacta con la zona de debilidad estructural descrita por *Lanyi (1972b)*.

La Figura 16 presenta la fisura hallada, y en la Figura 17, se aprecia un detalle de la misma. El hecho de que la fisura se haya generado en el contacto hormigón - acero, podría guardar relación con un comportamiento diferencial entre ambos materiales, con deformabilidades y resistencias disímiles, actuando sobre un macizo rocoso de baja calidad geotécnica.



Figura 16. Contacto entre el revestimiento de hormigón del túnel de aducción, y el comienzo de la tubería de acero, en transición al puente tubería.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El incremento lento, pero sostenido, de las filtraciones detectadas en la Boca II del túnel de aducción del Complejo Hidroeléctrico Futaleufú, motivó el estudio, por parte del ORSEP, de sus posibles fuentes de aporte, a fin de determinar el grado de afectación a la seguridad del conjunto de las obras.

De un primer análisis de alternativas, sin mayores herramientas, se plantearon 3 escenarios posibles, en función del origen de las filtraciones:

a) procedencia de las precipitaciones, o de algún acuífero local, percolando una corta distancia, a través de las fisuras del macizo rocoso; b) origen en el embalse, atravesando un extenso tramo del macizo de tobas y andesitas brechosas; o c) filtraciones a través del túnel de aducción, revestido en 40 cm de hormigón, y en parte blindado con la tubería de acero del puente acueducto.

A partir del análisis hidrológico, se hizo evidente la relación instantánea entre los niveles de embalse y los caudales captados por los aforadores. Esto prácticamente descartó la posibilidad de que el agua recorriera 600 metros a través del macizo rocoso fisurado, por más carga hidráulica que actuara, ya que su permeabilidad debería ser inusualmente elevada. No se descartó, sin embargo, la influencia de las precipitaciones, aunque con una incidencia menor.

Se cotejaron posteriormente los parámetros hidroquímicos del agua del embalse con la captada por el aforador 2, dando cuenta de una similitud en todos los valores. La escasa alteración hidroquímica respecto del embalse, no sería compatible con un largo recorrido a través del macizo rocoso fisurado, reforzando la hipótesis de procedencia cercana a la Boca II, compatible con el escenario c).

Seguidamente, a partir de la recopilación y análisis de documentación de proyecto de índole geológica, geotécnica e ingenieril, se detectó la existencia de una zona de baja calidad geotécnica, muy próxima a la Boca II, en coincidencia con el comienzo de la tubería de acero. Las características de este sector, puesto de manifiesto en la etapa de proyecto como un punto crítico del sistema (Lanyi, 1972b), parecieran no haberse tenido en consideración al momento de diseñar el empotramiento del puente tubería.



Figura 17. Detalle de la fisura localizada en el contacto hormigón - acero, en el túnel de aducción, próximo a la Boca II.

Una visita expeditiva al sitio, reveló la presencia de fallas sobre el talud de excavación de la Boca II, que podrían responder a una expresión externa de la zona de debilidad detectada durante la etapa de proyecto.

Finalmente, durante una parada de mantenimiento programado, se redujo el nivel del embalse a su cota mínima, vaciando el túnel de aducción. Este hecho significó la interrupción de las filtraciones, y la confirmación fehaciente de su dependencia directa, dejando relegado el posible aporte de las precipitaciones a la dispersión en los datos relevados.

Al acceder al túnel de aducción y observar en forma directa el estado general del mismo, los autores del presente trabajo localizaron una fisura en el hormigón, sobre el contacto con la tubería de acero, de mayor espesor que otras presentes en el túnel. Esta singularidad se corresponde con la zona de debilidad estructural identificada por Lanyi (1972b), y observada desde el exterior, sobre el talud excavado.

Debido a su localización, en el contacto entre dos materiales con diferente comportamiento ante los esfuerzos provocados por la carga hidráulica, este sector representa en sí mismo un punto débil del sistema. La fisura detectada presenta, sobre la superficie del túnel, un área de desprendimiento del hormigón de unos 50 cm de longitud por un ancho de unos 5 a 7 cm. Si bien a primera vista parece cerrarse hacia el interior del macizo rocoso (Figura 17), se presupone que, al entrar el túnel en carga, podría expandirse, constituyendo una vía de filtración del agua. Si se consideran las observaciones de Lanyi, quien describió algunas de las discontinuidades como rellenas de arcilla, podría suponerse que este material es factible de ser arrastrado por el paso del agua, con la posible generación de cavidades de diverso tamaño, y el consecuente deterioro del revestimiento del túnel.

Cabe destacar que debido a que no fue considerado en el plan de mantenimiento de marzo de 2014, en dicha oportunidad no se llevó a cabo un tratamiento adecuado de las fisuras identificadas por los autores, por lo que al reiniciarse la carga del túnel reaparecieron las filtraciones.

Actualmente se monitorea sistemáticamente la evolución de los caudales, que continúan ascendiendo lentamente.

Los autores recomiendan la elaboración de un modelado geomecánico de estabilidad del talud, junto a la instalación de piezómetros horizontales en el frente, a fin de determinar la

presión ejercida por el agua y evaluar la necesidad de ejecución de drenes horizontales, así como otros métodos de sostenimiento.

En función de los resultados arrojados por el modelo, y de no registrarse aceleraciones en el proceso, los autores recomiendan planificar, para la próxima parada de mantenimiento general, las reparaciones necesarias, que podrían implicar un tratamiento localizado de inyecciones con lechada cementicia y/u otras soluciones, desde el túnel hacia el interior del macizo rocoso, a fin de sellar posibles vías de escape.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

LANYI, L. P., 1972a.

Perfil Geológico. Toma, Conducción y Central. Plano Geotécnico 598. Escala 1:2.000.  
*Departamento de Estudios y Proyectos. Agua y Energía Eléctrica S.E. Inédito.*

LANYI, L. P., 1972b.

Geología Zona Boca 2. Apoyo del puente Acueducto - Planos IOCHF 245-246-247.  
*Comisión Geotécnica Futaleufú. Agua y Energía Eléctrica S.E. 4 pp., 3 planos. Inédito.*

PUJOL, L., PUJOL, A. Y CABALLERO, C., 2013.

Informe Anual de Auscultación Mayo 2012 - Abril 2013  
*Volumen II. Aprovechamiento Hidroeléctrico Futaleufú. RED Ingeniería SRL. 158 pp. Inédito.*

SANDER, W., 1973.

Túnel de Conducción. Revestimiento y Juntas. Plano N° 8163c. Escala 1:5.000.  
*Departamento de Estudios y Proyectos. Agua y Energía Eléctrica S.E. Inédito.*





# Movilidad de sales por ascenso capilar a partir del acuífero freático en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca

## Mobility of salts by capillarity rise from the phreatic aquifer in the southwest sector of the Bahía Blanca city

Lexow, Claudio <sup>1,2</sup> ✉ - Scherger, Leonardo <sup>1,2</sup> - Pera Vallejos, Guillermo <sup>1</sup> - Bauer, Emiliano <sup>1</sup>

Recibido: 01 de agosto de 2018 • Aceptado: 22 de diciembre de 2018

### Resumen

*El sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por la presencia de suelos de textura fina y de un acuífero freático hipersalino somero, condiciones que determinan el predominio de movimientos hídricos verticales dentro de la zona no saturada (ZNS), propiciando la concentración de sales por evapotranspiración en los niveles superficiales del suelo. Estos procesos pueden relacionarse a problemáticas en pavimentos y estructuras de hormigón en la zona. Este trabajo tiene como objetivo determinar los principales mecanismos de movilidad y acumulación de sales en un terreno limo arcilloso mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D. El modelo de transporte propuesto basado en datos antecedentes, correspondientes al período 2011 - 2017, permite establecer condiciones similares a los valores actuales de campo. El movimiento de sales en el perfil de suelo se encuentra ligado a la hidrodinámica natural de la ZNS, donde los procesos de capilaridad y evapotranspiración son los principales agentes de acumulación de solutos. Las precipitaciones permiten el ingreso de agua de baja salinidad al perfil ocasionando la dilución de las concentraciones. La ocurrencia de períodos climáticos cálidos y secos son críticos para la acumulación de sales, generando un grave peligro para las estructuras en superficie, dada la alteración de las sales solubles sobre los agregados pétreos. En el futuro será necesario profundizar las simulaciones incorporando los procesos de precipitación, intercambio catiónico, dilución, etc., como las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.*

**Palabras Clave:** Zona no saturada, salinidad, Hydrus, transporte de solutos, Bahía Blanca.

### Abstract

*The southwestern sector of the Bahía Blanca city is characterized by the presence of fine textured soils and a shallow hypersaline aquifer, conditions that determine the predominance of vertical water movements within the unsaturated zone, favoring the concentration of salts by evapotranspiration in the superficial levels of the soil. These processes can be related to problems in pavements and concrete structures in the zone. The objective of this work is to determine the main mobility and accumulation mechanisms*

1. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA). Comisión de Investigaciones Científicas, San Juan 670 (8000,) Bahía Blanca

✉ lexow@uns.edu.ar

2. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), San Juan 670, B8000ICN, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

of salts in a clay loam soil by applying the HYDRUS 2D/3D code. The proposed transport model based on background data, corresponding to the 2011 - 2017 period, allows establishing similar conditions to the current field values. Movement of salts in the soil profile is linked to the natural hydrodynamics of the vadose zone, where the processes of capillarity and evapotranspiration are the main agents of solute accumulation. Precipitations allow the entrance of low salinity water into the soil profile causing the dilution of the concentrations. The occurrence of hot and dry climatic periods are critical for the salts accumulation, generating a serious danger for the surface structures, given the alteration of soluble salts on stone aggregates. In the future it will be necessary to deepen the simulations incorporating the processes of precipitation, cation exchange, dilution, etc., as the reactions in the soil-water-concrete interface.

**Keywords:** Vadose Zone, salinity, Hydrus, solute transport, Bahía Blanca.

## INTRODUCCIÓN

El sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por la presencia de suelos de texturas finas y de un nivel freático somero, condiciones que determinan el predominio de movimientos verticales y la transferencia del agua por ascenso capilar a través de la zona no saturada (ZNS), propiciando la concentración de sales por evapotranspiración (Pérez Marfil *et al.*, 2017). Tanto la evaporación como la transpiración remueven la humedad del suelo, generando un incremento de las concentraciones salinas en el agua edáfica remanente (Corwin *et al.*, 2007). De este modo, la salinización del suelo se vería acelerada por la ocurrencia de altos gradientes mátricos, especialmente dada la existencia de acuíferos freáticos hipersalinos someros.

En diversos sectores de la localidad se han detectado problemas (grietas y fisuras) en los pavimentos y estructuras de hormigón que, relacionadas a las condiciones del subsuelo que conforma el área, podrían estar vinculadas a este proceso. El deterioro del hormigón en suelos salinos se debe tanto al ataque físico como al ataque químico de las sales que penetran en su estructura. Únicamente las sales solubles de la solución edáfica son capaces de movilizarse dentro de los poros del material, y si ocurre evaporación las sales pueden precipitar, resultando en deformidades estructurales (Graham, 2005). Las reacciones químicas se manifiestan a través de efectos físicos nocivos tales como el aumento de la porosidad y la permeabilidad, disminución en la resistencia, fisuración y delaminación (Oshiro *et al.*, 2008). Irassar *et al.* (2010) demostraron que la cristalización de sales en el interior del cuerpo poroso del hormigón genera la microfisuración y el descascaramiento de la superficie. El proceso requiere la presencia de agua, que transporte la sal en solución a través de los poros interconectados, de evaporación que provoque la sobresaturación de la sal en los poros y la cristalización en estas condiciones. El acuífero freático costero de la ciudad de Bahía Blanca es catalogado como hipersalino, siendo el agua subterránea clasificada como clorurada sódica a clorurada sulfatada sódica (Bonorino y Sala, 1983). Las sales solubles se movilizan libremente en el perfil no saturado vinculadas mayormente a flujos hídricos verticales ascendentes, donde la posición del nivel freático ejerce un control efectivo en la hidrodinámica del sistema no saturado (Lexow *et al.*, 2017; Scherger, 2017).

Los modelos de simulación han sido herramientas muy valiosas para estudios que involucran procesos complejos e interactivos en el flujo de agua y transportes de solutos dentro de la ZNS. El código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006) es uno de los modelos más aceptados en la bibliografía en la

evaluación de parámetros hidráulicos del suelo, transporte de solutos, diagramas de riego y fertilización, calidad de agua edáfica y simulación de flujos hídricos, entre otros. (Arbat *et al.*, 2003; Ajdary, 2008; Askry *et al.*, 2014; Gardenas *et al.*, 2005; Lexow, 2010, 2011; Phogat *et al.*, 2013, 2014; Xuexuan *et al.*, 2017). Las simulaciones numéricas mediante la aplicación del software HYDRUS permitirán evaluar la magnitud del aporte de sales al suelo y verificar la situación actual, mediante datos recabados en campo. El código, ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards modificada para el flujo no saturado, que incorpora la extracción de humedad por raíces, y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos. El objetivo de este trabajo es determinar los principales mecanismos de movilidad y acumulación de sales en un terreno limo arcilloso desde el acuífero freático somero en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Bahía Blanca se encuentra en el sector Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, aproximadamente en los 38°43' Latitud Sur y 62°16' Longitud Oeste. El área de estudio se ubica en el sector sudoeste de la localidad, en cercanías a la localidad de Ingeniero White, hacia el Oeste y al estuario de Bahía Blanca, hacia el Sur. En este sector se ubican el parque industrial y petroquímico, el puerto de Bahía Blanca, algunos asentamientos informales y vías de comunicación.

El clima de la ciudad de Bahía Blanca es templado, con valores medios de temperatura comprendidos entre 14 °C y 20 °C y estaciones térmicas bien diferenciadas (Capelli de Steffens y Campo de Ferraras, 2004). Las precipitaciones medias para el período de 1908 - 2008 en el suroeste bonaerense se estimaron en 584 mm (Campo *et al.*, 2009). Los máximos valores de precipitación se manifiestan en primavera y en otoño y los mínimos en invierno. Carrica y Lexow (2006) estimaron valores de evapotranspiración potencial (ETP) de 1170 mm y evapotranspiración real (ETR) de 401 mm para el período 2003-2006.

Geomorfológicamente, el área comprende una plataforma de abrasión marina labrada, sobre sedimentos Plio-pleistocénicos, por ingresiones marinas holocenas. Sobre la misma se depositan sedimentos de origen marino, asociados a rellenos de marea. Las áreas que denotan condiciones naturales se presentan como relictos restringidos, ya que la mayor parte del área se encuentra modificada antrópicamente. La geología fue descrita por Fidalgo (1983), quien denominó Sedimentos Pampeanos (Fidalgo *et al.*, 1975), a limos loessicos de edad Pliocena

que subyacen a los depósitos marinos recientes de la Formación Maldonado (Fidalgo, 1983). Esta última consiste en una facies granodreciente, con arenas oscuras en la base (con contenidos de fracción limo o limo arcilla menor al 35%) que pasan gradualmente a limos arenosos, limos arcillosos y arcillas limosas (carente o con contenidos muy pobres de arena). El relleno artificial de los suelos comprende material de relleno constituido por sedimentos pampeanos triturados y compactados artificialmente. En el área circundante a los canales de navegación se adiciona material arenoso mediano a fino originado durante las tareas de dragado del estuario. El acuífero costero libre se encuentra contenido por la Formación Maldonado conjuntamente con los Sedimentos Pampeanos, quienes forman el piso de los canales de navegación del estuario de Bahía Blanca. Aunque existen diferencias en sus características litológicas, ambas pueden ser consideradas como una única unidad hidrogeológica. El nivel freático en el área costera, catalogado como hipersalino por Bonorino y Sala (1983), mantiene profundidades someras, cercanas al metro en la mayor parte del año, formando anegaciones temporales durante los períodos húmedos de máxima expresión.

Los suelos naturales presentan texturas franco limosas a franco arcillosas, con escasa cobertura vegetal, en general de tipo halófito; son de escaso desarrollo, salinos y mal drenados. En superficie, muestran eflorescencias salinas y en profundidad grandes cantidades de carbonato de calcio y yeso, clasificándolos como Ustifluventes ácuicos y Salortides acuólicos (INTA, 1989).

## METODOLOGÍA

El modelo de movilidad de sales solubles en el perfil no saturado se realizó mediante la aplicación del software HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006). El código HYDRUS ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards modificada (1) para el flujo no saturado y de advección-dispersión (2) para el transporte de solutos, en determinada sección de estudio, según condiciones iniciales y de borde establecidas por el usuario. La ecuación de Richards modificada, que añade un término sumidero para incorporar la extracción de agua por raíces, es resuelta mediante el método de elementos finitos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] - S \quad (1)$$

Donde  $\theta$  representa la humedad volumétrica ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ),  $h$  es la presión matricial (cm),  $S$  es el término sumidero ( $\text{cm}.\text{día}^{-1}$ ),  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) son las coordenadas espaciales,  $t$  es el tiempo (s),  $K_{ij}^A$  son las componentes del tensor de anisotropía adimensional y  $K$  es la conductividad hidráulica no saturada ( $\text{cm}.\text{día}^{-1}$ ).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} + \frac{\delta(\theta c)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left( \theta D \frac{\delta c}{\delta z} - qc \right) - S \quad (2)$$

Donde  $c$  representa la concentración en la fase líquida ( $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $D$  es el coeficiente de dispersión hidrodinámica ( $\text{cm}^2.\text{día}^{-1}$ ),  $q$  representa el flujo no saturado ( $\text{cm}^3.\text{día}^{-1}$ ) y

$z$  (cm) es la dirección del flujo considerándose flujo vertical unidireccional.

El modelo fue calibrado siendo capaz de representar al final de la simulación la situación actual de campo. Durante diversas campañas se relevó la profundidad del nivel freático y se tomaron muestras de suelo y agua subterránea para su posterior análisis en laboratorio y caracterización físico-química.

## Elaboración del Modelo

El período de simulación consistió en 2451 días, iniciando el 01/01/2011 y finalizando el 13/09/2017. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,01 (día), paso mínimo  $1.e^{-003}$  (día) y máximo 1 (día). El modelo hidráulico elegido para la simulación fue el propuesto por Van Genuchten-Mualem (3) (Van Genuchten, 1980; Mualem, 1976).

$$Se = 1 + [(\alpha h)^n]^{-m} \quad (3)$$

Donde  $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$  es la humedad efectiva,  $\alpha = h_a^{-1}$  es un parámetro empírico determinado por la inversa del valor de entrada de aire,  $h$  corresponde a la tensión matricial y  $n$  y  $m$ , son parámetros empíricos siendo  $m = 1 - 1/n$ . La conductividad hidráulica (4) se estima mediante la ecuación:

$$K(Se) = K_s Se^l \left[ 1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (4)$$

Donde  $K_s$  corresponde a la conductividad hidráulica saturada y  $l$  es la conductividad de poro para el cual se sugiere un valor de 0,5 por Mualem (1976) tras numerosos ensayos en varios suelos.

Se consideró una sección estudio rectangular de 120 cm de alto y 100 cm de ancho, la cual fue discretizada en una malla de 801 nodos y 1512 subdominios triangulares. El material considerado consistió en un limo arcilloso cuyos parámetros hidráulicos (Tabla 1) fueron estimados mediante la función de pseudotransferencia Rosseta Lite (V1.1) (Schapp et al., 2001).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos utilizados en la simulación.

Textura	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$	$n$	$K_s$ ( $\text{cm}.\text{día}^{-1}$ )
Limo arcilloso	0,4795	0,0942	0,0113	1,4085	13,22

Las condiciones iniciales fueron introducidas en términos de presión matricial, considerando valores típicos para la fecha de inicio de simulación (Lafont, 2009; Lexow et al., 2017; Scherger, 2017). El límite superior de la sección, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por la precipitación diaria y la ETP de referencia que fue estimada por el método de Penman-Monteith modificado según la FAO N° 56 (1998) (Figura 1). Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que para el límite inferior se considera un potencial constante,  $h=0$  cm, representativo de un nivel freático estático. Se introduce el término de extracción de agua por raíces bajo el modelo de Feddes et al., 1978 (en Simunek et al., 2006), considerando una cubierta herbácea de profundidad de raíces somera.

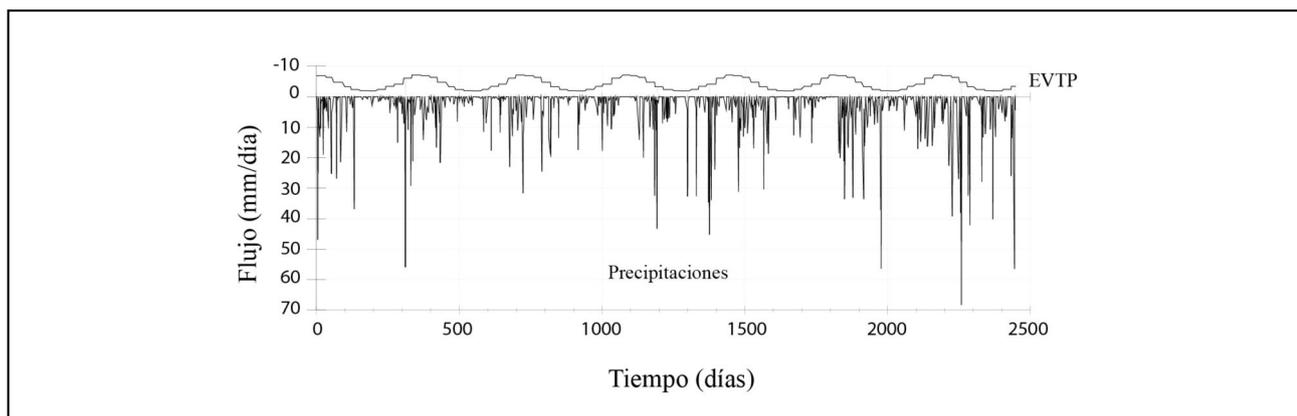


Figura 1. Flujos atmosféricos correspondientes al período 2011-2017.

$$\text{TSD} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \text{CE} * 0,64 \quad (5)$$

La concentración salina del agua subterránea (TSD) (5) se calculó a partir de la relación con la conductividad eléctrica (CE) la cual se obtuvo a partir del modelo matemático de estimación lineal para todas las muestras relevadas.

La concentración de sales en el agua de lluvia se tomó como un valor constante de  $64 \text{ mg.L}^{-1}$  (Carrica, 1998). Las sales se simularon como solutos no reactivos, siendo despreciables los procesos de adsorción, disolución, intercambio catiónico, etc. La dispersividad longitudinal ( $\alpha_L$ ) fue considerada de 17 cm, siendo la dispersividad transversal ( $\alpha_T$ ) un 10% de la anterior y la difusividad en fase líquida de  $5 \text{ cm}^2\text{día}^{-1}$ , similarmente a los expuestos en la bibliografía existente (Forkutsa et al., 2009; Phogat et al., 2013; Phogat et al., 2014 y Yurtseven et al., 2014, entre otros).

#### Calibración del modelo

Para la comprobación de la metodología se comparan las simulaciones obtenidas con datos registrados en campo. La validación se realizó mediante el estimador estadístico del cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (6).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim}} - Q_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Donde  $Q_{\text{sim}}$  corresponde al valor de concentración salina obtenida en la simulación y  $Q_i$  es el valor medido en campo, siendo  $n$  la cantidad de muestras relevadas.

## RESULTADOS

### Comportamiento Hidrodinámico

Las simulaciones obtenidas (Figura 2) reflejan la dinámica del sistema no saturado, donde las características del terreno limo arcilloso natural y las condiciones atmosféricas e hidrológicas del entorno son los factores que controlan los flujos hídricos verticales dentro de la ZNS.

El perfil de suelo refleja humedades volumétricas relativamente altas durante todo el transcurso del período simulado. Los niveles superficiales, representados por los nodos de 15 cm

y 30 cm, indican los contenidos máximos y mínimos de humedad, vinculados a la existencia de períodos climáticos húmedos o secos respectivamente. Las precipitaciones de gran cuantía generan condiciones de saturación parcial en la superficie del terreno, donde la infiltración, encargada de redistribuir el bulbo húmedo a lo largo del perfil, es limitada por los bajos valores de permeabilidad vertical del terreno. Durante los meses de invierno, caracterizados por valores bajos de EVTP, suelen generarse encharcamientos en campo, que pueden extenderse varios días luego de transcurrida la lluvia.

A medida que incrementa la profundidad decrece la influencia de las condiciones atmosféricas superficiales sobre la hidrodinámica del medio, siendo las variaciones de humedad más restringidas. En esta zona, la acción de la evapotranspiración disminuye notablemente, dado que las raíces no se extienden más de 25 cm de profundidad en campo, siendo el proceso de capilaridad el fenómeno que permite la existencia de flujos verticales ascendentes. Los nodos de 60 cm y 90 cm mantienen contenidos volumétricos entre  $42$  a  $44 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  y entre  $45$  a  $48 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  respectivamente. Estos nodos son influenciados directamente por la presencia del nivel freático somero, el cual se ubica a 120 cm de profundidad durante el período simulado. Con el modelo propuesto se determinó un espesor para la franja capilar (FC) de hasta 95 cm, similarmente a los valores expuestos por otros autores, la cual se moviliza masivamente con las fluctuaciones del nivel freático (Pérez Marfil et al., 2017; Lexow et al., 2017).

Las tensiones matriciales simuladas durante el período son características de materiales finos, donde los gradientes de potencial en el perfil no saturado son consistentes con bajas velocidades de transferencia de humedad. Para que existan grandes cambios en el contenido volumétrico son necesarios grandes variaciones de tensión matricial, hecho que se refleja en las bajas pendientes de la curva de retención de humedad para estos materiales. Los nodos más superficiales, ubicados en la zona de evapotranspiración muestran los valores de succión más negativos, de hasta  $-150$  cm, reduciéndose hasta valores de 0 cm durante la saturación del terreno. En el sector de la FC las tensiones se mantienen con valores menores que la presión de entrada de aire ( $h_a$ ), considerada en 88,4 cm para el material limo arcilloso. Aquí la posición del nivel freático determina una influencia directa sobre la tensión matricial y el contenido de humedad del terreno, siendo ambos los reguladores del flujo hídrico vertical en el sector no saturado.

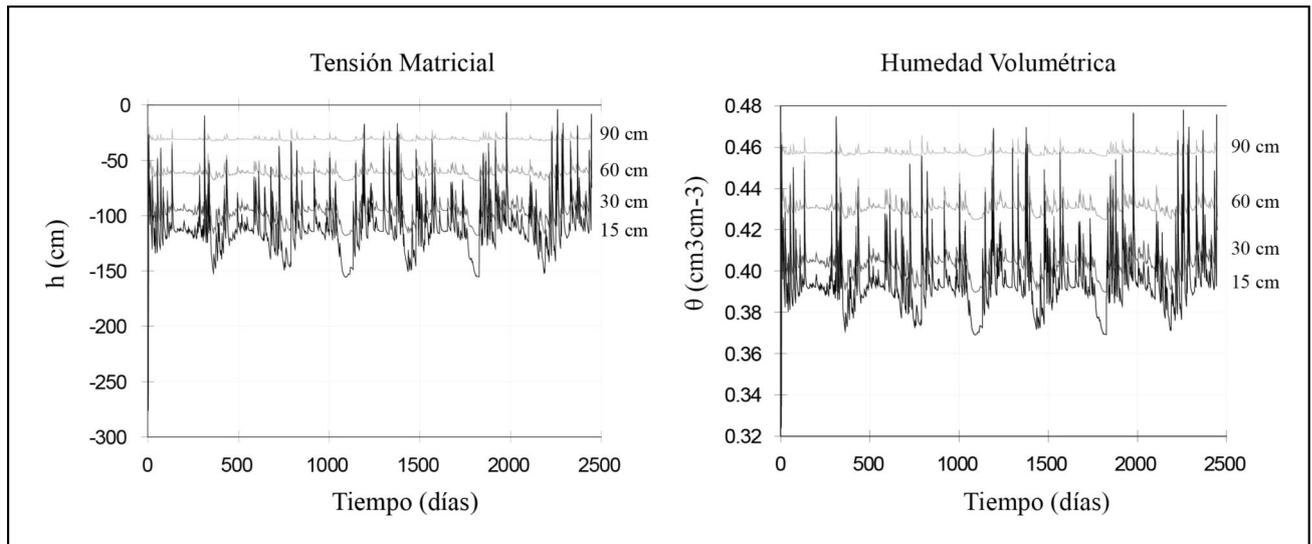


Figura 2. Simulación de la tensión matricial y humedad volumétrica para el período 2011-2017.

#### Evaluación del flujo no saturado

La dirección del flujo hídrico en la ZNS, considerando únicamente el sentido vertical, queda determinado por las variaciones del potencial hidrodinámico total (PHT), donde la humedad se desplaza desde las zonas de mayor a menor potencial. De este modo, la ZNS puede ser subdividida en sectores donde el agua puede moverse en forma ascendente, con dominio de potenciales mátricos y contribuir a la evapotranspiración o descendente, con dominio de potencial gravimétrico, como recarga en tránsito. Las simulaciones del PHT poseen un registro muy diverso durante el período 2011 - 2017, aunque pueden agruparse en cuatro escenarios, caracterizadas por diferentes situaciones de flujo, siendo los mismos netamente ascendente, netamente descendente, ascendente en la porción superior y descendente en la porción inferior o viceversa (Figura 3). En estos dos últimos casos, se destaca la existencia de un plano de flujo cero (PFC), donde la humedad diverge o converge respectivamente.

La existencia de flujo netamente ascendente en el perfil no saturado es asociada a períodos climáticos secos y cálidos, caracterizados por altos valores de ETP. La cercanía del nivel freático a la superficie, permite el ascenso directo de humedad a los niveles superficiales del suelo, fenómeno promovido a su vez por las características texturales del terreno. Bajo estas condiciones, las sales solubles podrán ser movilizadas desde el acuífero hipersalino conjuntamente con el agua capilar, acumulándose en los niveles superficiales del suelo a medida que la humedad es transferida a la atmósfera.

El ingreso de agua al perfil, ocasionado por las precipitaciones, genera un aumento de la humedad en los poros del terreno disminuyendo la tensión capilar. Cuando las fuerzas gravitatorias superan la componente matricial del PHT, se generan flujos verticales descendentes en los niveles superiores de la ZNS, conformándose un PFC convergente. Si las precipitaciones son de gran cuantía, se logran establecer condiciones de flujo netamente descendente donde la humedad infiltra, percola y posteriormente recarga al acuífero hasta que el descenso de humedad en la porción superior, ya sea por transferencia hacia los sectores profundos o debido al desecamiento por

evapotranspiración, permite nuevamente el aumento en la succión del terreno y el predominio de flujos ascendentes en la porción superior. Bajo estas condiciones se genera un PFC divergente, cuya profundidad podrá variar hasta que se retorne a alguno de los escenarios previos.

Aunque en la Figura 3, se esquematiza el modelo simplificado de flujo en la ZNS cabe destacar que el pasaje de un escenario a otro es sumamente dinámico, siendo en la realidad muy variables las condiciones de flujo no saturado, regulado principalmente por las condiciones meteorológicas e hidrogeológicas del subsuelo (heterogeneidad textural, estructura, propiedades físico-químicas y biológicas).

#### Evaluación de la movilidad de sales solubles

Las sales solubles en la ZNS fueron simuladas como solutos no reactivos, considerándose a los procesos de advección y dispersión hidrodinámica los encargados del transporte. El acuífero freático comprende la fuente de salinidad, las cuales ascienden a los niveles superiores del suelo por los procesos explicados anteriormente. El tenor salino del agua subterránea fue determinado en  $6400 \text{ mg.L}^{-1}$  aproximadamente, equivalente a conductividades eléctricas cercanas a  $10.000 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ , medidas en laboratorio.

Los resultados alcanzados en la simulación permiten presentar la situación actual de campo (Figura 4), siendo el ajuste logrado aceptable en los niveles profundos del suelo con un valor de RMSE (raíz del error cuadrático medio) de  $0,22 \text{ g.L}^{-1}$ , simulándose en forma aceptable la transferencia de sales al sistema no saturado por ascenso capilar desde el acuífero hipersalino.

Las concentraciones salinas en el suelo, se encuentra ligadas directamente a los flujos hídricos no saturados. Los nodos de 15 cm y 30 cm reflejan la movilidad de sales solubles en los niveles superficiales del suelo (Figura 5). Durante períodos de escasas precipitaciones y gran demanda de humedad por parte de la atmósfera, priman los movimientos de humedad verticales ascendentes generando la acumulación de sales en los niveles superficiales del suelo por evapotranspiración. En estos

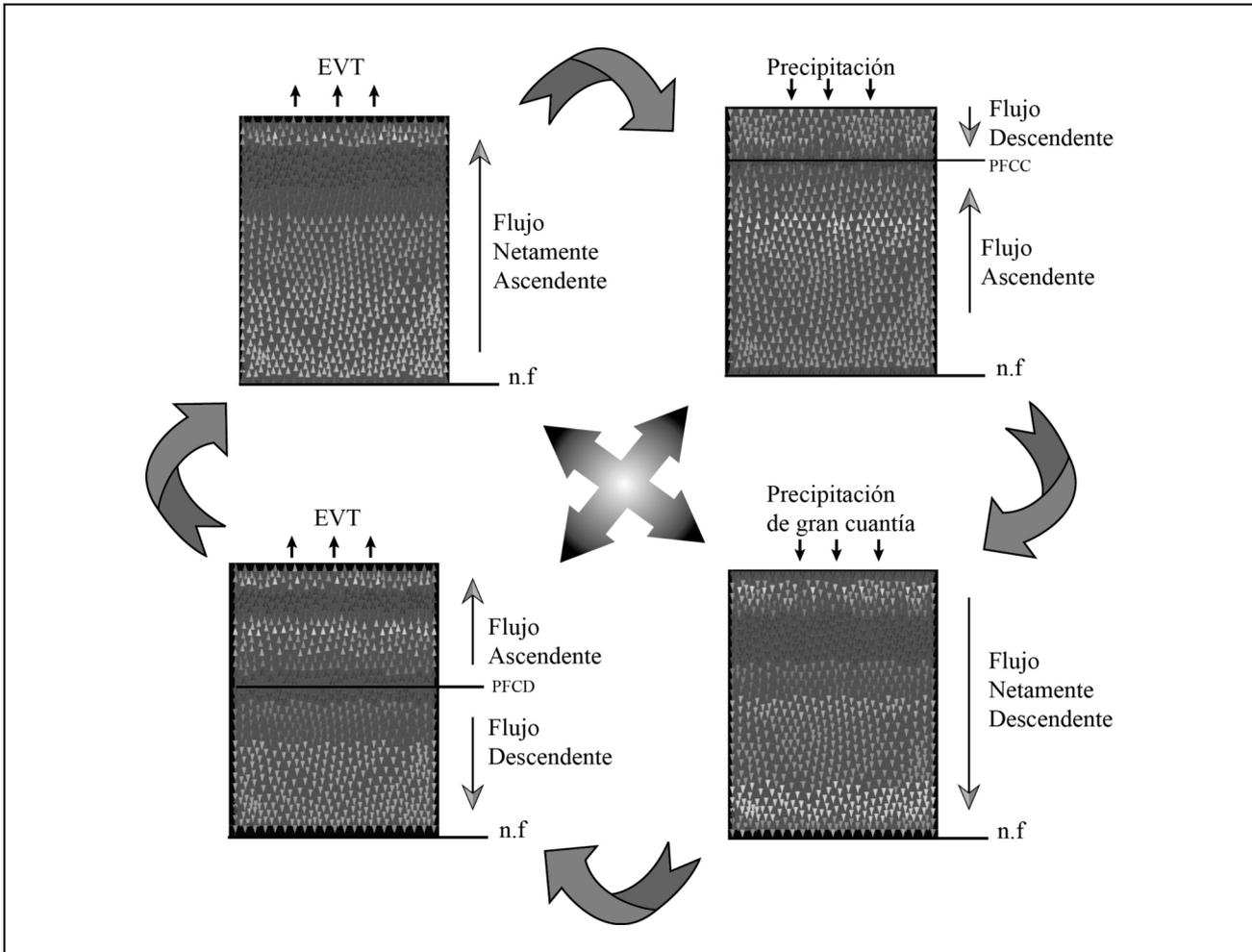


Figura 3. Modelo esquemático del flujo de humedad unidireccional vertical en la ZNS.

períodos las concentraciones salinas presentan picos de hasta 18000 mg.L<sup>-1</sup>, siendo muy superiores a las concentraciones halladas en el acuífero freático. Estos episodios representan un potencial peligro para las estructuras y construcciones de hormigón, dada la alteración de las sales solubles sobre los agregados pétreos (Pérez Marfil et al., 2017). Los efectos pueden verse magnificados especialmente durante períodos de stress hídrico, como los ocurridos en los meses de verano del año 2013 y 2015.

Las precipitaciones aportan agua de baja salinidad al suelo, promoviendo los procesos de lavado y dilución. Este efecto es observable en años húmedos como el 2011, 2014, 2016 y 2017, donde las precipitaciones superaron los 500 mm anuales. Durante los meses lluviosos el lavado remueve las sales de los niveles superficiales y transporta los solutos hacia la base del perfil, encontrándose concentraciones de entre 2000 mg.L<sup>-1</sup> a 5000 mg.L<sup>-1</sup>.

En sectores profundos de la sección, la posición del nivel freático ejerce influencia sobre las concentraciones salinas del mismo modo que lo hace sobre la hidrodinámica. Las concentraciones en la FC varían entre 3500 mg.L<sup>-1</sup> a 8000 mg.L<sup>-1</sup>, según la época del año, consistentes en períodos climáticos húmedos o secos, encontrándose en pseudoequilibrio con la salinidad del agua subterránea (Figura 5).

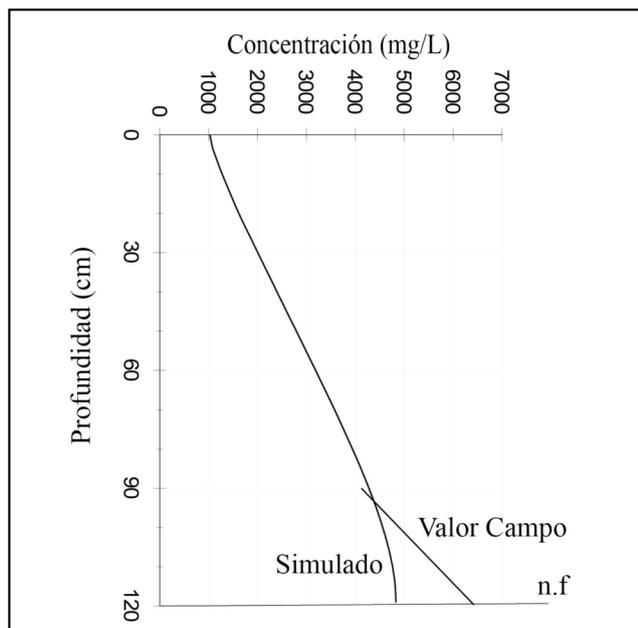


Figura 4. Valores de concentración simulados y medidos en campo para t=2451.

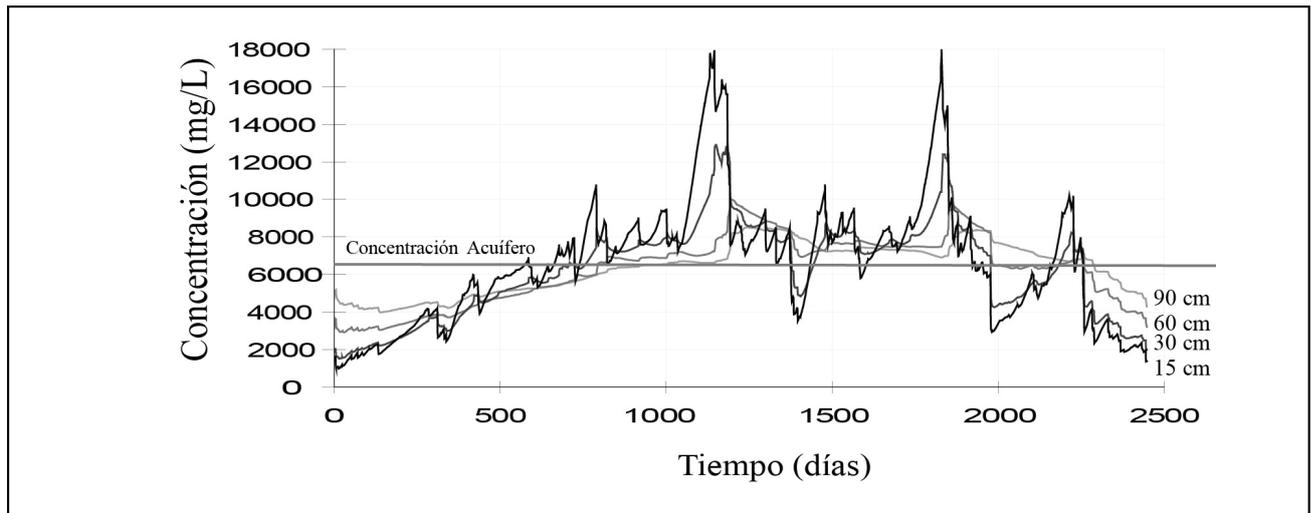


Figura 5. Simulación de las concentraciones salinas para el período 2011-2017.

De acuerdo a los resultados obtenidos se comprueba que ciertas problemáticas relacionadas al deterioro de pavimento y estructuras de hormigón en el sector Sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca podrían relacionarse a la presencia de sales solubles en los niveles superficiales del suelo. Las simulaciones realizadas permiten establecer un escenario factible para el transporte de solutos en el medio no saturado, donde la presencia de un acuífero freático somero hipersalino sumado a la textura fina del suelo permite el ascenso de sales solubles debido a los fenómenos de capilaridad y evapotranspiración. En el futuro será necesario profundizar las simulaciones incorporando los procesos de precipitación, intercambio catiónico, dilución, etc., como las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.

### CONCLUSIONES

Los suelos del sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca presentan problemas de salinidad asociados a la transferencia de solutos desde el acuífero hipersalino. El ascenso capilar es puesto en marcha por el proceso de evapotranspiración y

favorecido por la textura fina de los sedimentos que componen la ZNS.

Las simulaciones con el código HYDRUS 2D/3D permiten evidenciar la dinámica salina, lográndose distinguir la influencia de la franja capilar y de las condiciones atmosféricas sobre las concentraciones de sales en el perfil de suelo. Los períodos cálidos y secos comprenden el escenario de mayor peligro para las estructuras de superficie, donde la acumulación de sales puede llegar hasta concentraciones de 18000 mg.L<sup>-1</sup>.

Las precipitaciones permiten el ingreso de agua de baja salinidad al perfil de suelo, ocasionando los procesos de lavado y dilución.

Las concentraciones en la franja capilar se encuentran en pseudoequilibrio a las halladas en el acuífero freático. Será necesario profundizar el muestreo de campo para lograr un mejor ajuste del modelo de transporte, como así también incorporar en la simulación las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AJDARY, K., 2008.  
Application of Hydrus-2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils.  
*International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey, 2008. Pp: 253-261.*
- ARBAT, G., BARRAGÁN, J., PUIG, J., POCH, R. Y RAMÍREZ DE CARTAGENA, F., 2003.  
Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo hydrus-2d y Simdas en riego localizado.  
*Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (eds.), 2003.*
- ASKRI, B., ABDELKADER T., TAREK, A., RACHIDA, B., 2014.  
Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use.  
*Journal of Hydrology. Vol. 513 (2014): 81-90.*
- BONORINO, A. G. Y SALA, J. M., 1983.  
Capítulo: Geohidrología. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la Provincia de Buenos Aires.  
*Informe Final. La Plata. Inédito.*
- CAMPO, A., RAMOS, B. Y ZAPPERI, P., 2009.  
Análisis de las variaciones anuales de precipitación en el suroeste bonaerense, Argentina.  
*XII Encuentro de Geógrafos de América Latina. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 12 pp.*  
[Actas electrónicas: [http://legal2009.easyplanners.info/area07/7085\\_Campo\\_Alicia\\_M\\_.pdf](http://legal2009.easyplanners.info/area07/7085_Campo_Alicia_M_.pdf)].

- CAPELLI DE STEFFENS, A. M. Y CAMPO DE FERRERAS, A. M., 2004.  
Climatología.  
*En: Ecosistema del estuario de Bahía Blanca. Piccolo, M. C. y M. S. Hoffmeyer (eds.). Instituto Argentino de Oceanografía, Bahía Blanca, Argentina. Pp 79-88.*
- CARRICA, J., 1998.  
Hidrogeología de la Cuenca del Arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires.  
*Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Biblioteca Central, 215pp y anexos. Inédito.*
- CARRICA, J.C. Y LEXOW, C., 2006.  
Subsistencia en el área costera de Bahía Blanca, Argentina.  
*VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asunción, Paraguay. En CD.*
- CORWIN D L, RHOADES, J.D. Y SIMUNEK, J., 2007.  
Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models.  
*Agricultural Water Management Vol. 90: 165-180.*
- FAO, 1998.  
Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage: paper 56.  
*FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.*
- FEDDES, R. A., KOWALIK P. J., AND ZARADNY, H., 1978.  
Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons,  
*New York, NY, 1978.*
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, J. Y PASCUAL, R., 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
*VI Congreso Geológico Argentino (Bahía Blanca). Relatorio, 104 - 128, Buenos Aires.*
- FIDALGO, F., 1983.  
Geología y Geomorfología del área de White-Cerri y los alrededores de bahía blanca.  
*Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la provincia de buenos Aires. Inédito.*
- FORKUTSA, I., SOMMER, R, SHIROKOVA, I, LAMERS, J.P.A., KIENZLER, K, TISCHBEIN, B., MARTIUS, C. Y VLEK, P.L.G., 2009.  
Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II.  
*Soil salinity dynamics. Irrigation Science (2009) Vol. 27:319-330.*
- GARDENAS, A.I., HOPMANS, J.W., HANSON, B.R. Y SIMUNEK, J., 2005.  
Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation.  
*Agricultural Water Management. Vol. 74 (2005): 219-242.*
- GRAHAM, T., 2005.  
On the road to better management: An investigation into the benefits of managing the impacts of dryland salinity on roads.  
*Proceeding of the 49th Conference of Australian Agricultural and Resource Economics Society.*
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA, 1989.  
Mapas de suelos de la Provincia de Buenos Aires.  
*Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 527 p., Buenos Aires.*
- IRASSAR, E.F, DI MAIO, A. Y BATIC, O.R., 2010.  
Deterioro de hormigón por cristalización de sales.  
*VI Congreso Internacional sobre patología y recuperación de estructuras. Córdoba, Argentina. Actas de Congreso.*
- LAFONT, D., 2009.  
Identificación y caracterización de contaminantes metálicos en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca.  
*Tesis Doctoral. UNS. Bahía Blanca. 137p y anexos. Inédito.*
- LEXOW, C., 2010.  
Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina. 21 al 24 de Septiembre del 2010. Actas de Congreso.*
- LEXOW, C., 2011.  
Flujo transitorio en suelos limo arenosos: aplicación del código Hydrus 2D /3D.  
*VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Sesión Técnica: Captación y Modelación de Agua Subterránea. Salta, Argentina, 2011. Actas de congreso. ISBN: 978-987-23936-8-7.*

- LEXOW, C., PERA VALLEJOS, G. Y BAUER, E., 2017.  
Comportamiento de la franja capilar en el sector oeste de la Ciudad de Bahía Blanca.  
*XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán. Sección Técnica 15, pág.: 65-66.*
- MUALEM, Y., 1976.  
A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.  
*Water Resources Research. Vol. 12(3):513-522.*
- OSHIRO, A., BARONETTO, C., BELTRAMONE, C. Y POSITIERI, M., 2008.  
Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química.  
*Exacta, Vol. 6 (1): 93-108. ISSN 1678-5428.*
- PEREZ MARFIL, P., BAUER, E., LESCOANO, L., PERA VALLEJOS, G., PRIANO, C., BEREZOSKY, J.J., LEXOW, C. Y MARFIL, S., 2017.  
Causas del deterioro prematuro de pavimentos de hormigón de la Ciudad de Bahía Blanca y rutas de acceso, su relación con la franja capilar.  
*IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Provincia de Buenos Aires, Ciudad de Quilmes. E-book, Actas: 12 pp.*
- PHOGAT, V., SKEWES, M.A., MAHADEVAN, M. Y COX, J.W., 2013.  
Modelling water and salinity distribution in soil under advance fertigation systems in horticultural crops.  
*20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013.*
- PHOGAT, V., SKEWES, M.A., COX, J.W., SANDERSON, G., ADAM J. Y SIMUNEK, J., 2014.  
Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching.  
*Journal of Hydrology. Vol. 513, (2014): 504-516.*
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F.J. AND VAN GENUCHTEN, M. TH., 2001.  
Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions.  
*Journal of Hydrology, Vol. 251, (2001):163-176.*
- SCHERGER, L. 2017.  
Aplicación del código Hydrus 2D/3D para el estudio de la hidrodinámica de la ZNS, en el ámbito industrial de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina.  
*IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Provincia de Buenos Aires, Ciudad de Quilmes. E-book, Actas: 12 pp.*
- SIMUNEK, J., SEJNA M., AND VAN GENUCHTEN M. TH., 2006.  
The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media.  
*Version 1.0.PC Progress, Prague, Czech Republic.*
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980.  
A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.  
*Soil Science Society of American Journal, Vol. 44(3):892-898.*
- XUEXUAN, X., SHAHMIR, A., WENYUAN, C. Y SAJJAD, R., 2017.  
The evaluation/application of Hydrus-2D model for simulating macro-pores flow in loess soil.  
*International Soil and Water Conservation Research. Vol. 5(2017): 196-201.*
- YURTSEVEN, E., OZTURK, H.S. Y AVCI, S., 2014.  
Mass Balance Criteria in Soil Salinity Management: Different Irrigation Water Qualities and Leaching Ratio.  
*Journal of Agricultural Sciences Vol.20 (2014) 103-111.*





## Patrón de micro distribución de *Ctenomys Talarum*, su rol como bioindicador en un pasivo de explotación de arenas en dunas costeras

### Microdistribution pattern of *Ctenomys Talarum*, a bioindicator over operating liabilities on a sand quarry in coastal dunes

Taverna, Bernardo Daniel <sup>1,2</sup> ✉ - del Río, Julio Luis <sup>2</sup> - Antenucci, Daniel <sup>3</sup>

Recibido: 10 de agosto de 2018 • Aceptado: 29 de diciembre de 2018

#### Resumen

*En la provincia de Buenos Aires los áridos, en particular de arena, representan una de las principales materias primas relacionadas con la construcción y su extracción se da en la zona del delta del río Paraná y en las dunas de la costa atlántica. Asimismo, la explotación de dicho recurso provoca un profundo impacto sobre el ecosistema asociado. La utilización de un bioindicador es una herramienta de preponderancia a la hora de evaluar la sustentabilidad de una actividad. En este sentido *Ctenomys talarum* o tuco tuco representa un excelente modelo para ser utilizado como bioindicador, ya que esta especie de roedor habita naturalmente las dunas de la Costa Atlántica. Es por ello, que se realizó un relevamiento del área para identificar puntos de actividad de *C. talarum* en una arenera situada en las cercanías del Faro Querandí, partido de General Madariaga. Para determinar el patrón de distribución de la especie los puntos de actividad fueron georeferenciados y trasladados a mapas digitales. En todos los casos la distribución del roedor se centró principalmente en los sectores elevados de los pasivos en los límites de los terrenos con excepción del área de conservación, donde la distribución mostró el patrón opuesto. Este hecho podría deberse a la modificación producida por la percolación del agua superficial lo que produce encharcamientos y que limita la ocupación de los sectores más deprimidos del área impactada por un animal excavador como el *C. talarum*.*

**Palabras clave:** Impacto ambiental, Minería de Áridos, *Ctenomys*, bioindicador, arenas, sustentabilidad.

#### Abstract

*Aggregates represent one of the main raw materials related to the construction activity. Of all the resources that aggregates represent, sand is one of the most important elements. In Buenos Aires province the extraction of this resource is done on Paraná River delta and over dunes of the Atlantic coast.*

1. Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires (CIC-PBA)  
✉ bdtaverna@hotmail.com
2. Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario - CICPBA, Universidad Nacional de Mar del Plata
3. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - CONICET, Universidad Nacional de Mar del Plata

Nevertheless, this process represents a deep impact on the associated ecosystem. One way to determine the impact level of certain activities is to use a bioindicator. The species *Ctenomys talarum* is a caviomorph rodent distributed on the coastal dunes of the Atlantic coast of Buenos Aires. The work was carried out on a sand quarry located near the Querandí lighthouse. In this study we realized a survey of the area to identify activity points of *Ctenomys talarum*. This sector was georeferenced and then recorded on digital maps, to determine the distribution pattern of the species. In all cases the distribution was mainly centered to the higher places of the exploited areas, corresponding with the borders of the studied sectors. The exception was the conservation area where the distribution showed the opposite pattern. This fact could be due to the effect of percolation of the superficial water which generates ponds, affecting the access of a burrowing animal, like *Ctenomys talarum*, to the impacted area.

**Keywords: Environmental impact, Arid Mining, *Ctenomys*, bioindicator, sands.**

## INTRODUCCIÓN

Los áridos representan uno de los materiales más importantes para el desarrollo del hombre. Entre ellos la arena representa uno de los materiales más explotados debido a su utilización en la construcción, para la fabricación de concreto (Ayala Cacedo et al., 1996). Usualmente, la extracción de arenas se da en regiones costeras ricas en este recurso y cercanas a los asentamientos humanos (Lithgow et al., 2013).

La línea de costa está sufriendo fuertes modificaciones a causa de acciones ambientalmente desfavorables como la eliminación de las dunas costeras. Este efecto se produce a raíz de un conjunto de fenómenos que ejercen una fuerte presión sobre estos ambientes como el alojamiento y la recreación, el uso industrial y comercial, los depósitos de basura, la agricultura y la minería (Ketchum, 1972; Nordstrom, 2008).

La franja costera del océano Atlántico, en Buenos Aires, constituye un enorme recurso de arenas que se extiende en dirección NE-SO por cerca de 600 Km, desde el cabo San Antonio hasta Bahía Blanca, continuando al sur algo más de 250 Km hasta Punta Redonda, en las proximidades de Carmen de Patagones (Caballe et al., 2005). En la provincia de Buenos Aires la extracción de arena se realiza principalmente en dos zonas: el delta del Paraná y el cordón medanoso costero que se extiende por toda la mencionada franja costero-marina de la provincia (Caballe y Bravo Almonacid, 2006).

En la actualidad, se registran fuertes presiones en los ambientes costeros debido a la tendencia de las poblaciones humanas de establecerse cerca de la costa ya sea por turismo o por aumento de la densidad poblacional en el área continental (Roberts y Hawkins, 1999; Brown y McLachlan, 2002). La República Argentina no es una excepción y, particularmente en la provincia de Buenos Aires la franja costera conocida como costa atlántica ha mostrado un elevado desarrollo urbano durante los últimos 40 años (Marcomini y Lopez, 2006). Los principales receptores del recurso extraído de las dunas costeras son aquellas localidades que se encuentran en la costa atlántica. Actualmente se pueden contabilizar alrededor de 40 localidades que van desde ciudades hasta pequeñas villas costeras (del Río et al., 2017).

Sin embargo el proceso de extracción de este recurso genera un profundo impacto sobre el ambiente asociado, teniendo importantes efectos sobre la geomorfología, producto de la modificación de la topografía del área, así como sobre su ecología y biodiversidad, amenazando el desarrollo de especies endémicas propias de estos ambientes (Nordstrom, 2008; Martínez et al., 2013; De Luca et al., 2011; Faggi y Dadon, 2011). Sobre los hábitats de dunas se desarrollan comunidades bióticas complejas con estrechas interacciones, originadas por el desarrollo

de distintas especies vegetales y animales. Estas comunidades se ensamblan de forma característica, asociadas con la geomorfología del ambiente, que propicia y al mismo tiempo limita el desarrollo de las poblaciones. Alteraciones sobre los suelos, la geomorfología y la topografía pueden repercutir ampliamente sobre el normal desarrollo del ecosistema y modificar su dinámica ecológica.

De esta manera, y ante la posible alteración de la zona sometida a la actividad, es que se vuelve primordial establecer un manejo sustentable de la actividad de extracción de modo de poder disponer del recurso de una manera eficiente que contemple la recuperación de los ambientes impactados y la disponibilidad de recursos para generaciones futuras (Acosta Sariego, 2006). Situación que además se adecúa con el espíritu del artículo de la constitución nacional número 41 y el de la constitución provincial número 28.

Se considera que si en un ambiente impactado se detiene la actividad de impacto y se le permite estabilizarse, es factible alcanzar un estado de naturalidad similar al existente en forma previa a la explotación. Cuando esta situación se sucede, se entiende que el área se ha recuperado (Gallego Valcarce y Vaddillo Fernandez, 1992).

Una manera de aportar conocimiento para establecer la sustentabilidad de la minería de áridos es el monitoreo de la actividad y desarrollo de un organismo, de una especie en particular, considerada un bioindicador. Los bioindicadores son organismos que tienen un profundo nivel de asociación con el ambiente en el que se desarrollan y que pueden dar cuenta de las modificaciones que se dan en el ambiente sean naturales o antrópicas (Hawksworth, 1992).

Los caviomorfos del género *Ctenomys*, son los roedores fosoriales más representados en América del Sur. Este género se distribuye extensamente en América del Sur y está representado a lo largo de toda la Argentina, sur de Brasil, y en algunas áreas de Chile, Perú, Bolivia, Paraguay y Uruguay (Woods, 1984). *Ctenomys* habita normalmente en un sistema de galerías cerradas que se desarrollan paralelas a la superficie del suelo (Antinuchi y Busch, 1992). En una escala microespacial, los miembros de este género viven generalmente en suelos porosos y que presentan un buen drenaje (Contreras, 1973). La especie *Ctenomys talarum*, en particular, habita en pastizales costeros (Antinuchi y Busch, 1992) y más precisamente se desarrolla en la zona de médanos costeros de Buenos Aires. A diferencia de otros roedores subterráneos, *C. talarum* forrajea sobre el suelo saliendo de sus túneles por períodos breves de tiempo para acumular vegetación (Busch et al., 2000). Estas especies son consideradas ingenieros ecosistémicos debido a que la arena que excavan se extrae de la cueva siendo depositada en un montículo en la boca

de la cueva. Este efecto reciclador de sedimento favorece la circulación de nutrientes en el suelo y, a su vez, facilita el establecimiento y germinación de semillas y el posterior desarrollo de plantas (Hansell, 1993).

*Ctenomys talarum* se presenta como un buen bioindicador para la zona de estudio ya que en su hábitat natural se desarrollan sobre sedimento arenoso. De tal manera siendo este elemento el objeto de extracción de la actividad minera considerada, la pérdida de sedimento podría implicar una pérdida potencial de área de desarrollo para los individuos de *C. talarum*. Por lo tanto, debido a la relevancia de la especie en el ambiente y a que el ambiente dunicola representa gran parte de su hábitat, *C. talarum* se establece como un potencial bioindicador de amplia relevancia para el estudio del impacto de la actividad. El objetivo de este trabajo fue evaluar el patrón de distribución de *C. talarum* sobre un área de pasivos de explotación de extracción de arena de un emprendimiento ubicado en el partido de Gral. Madariaga.

**ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se ubica en los alrededores de las canteras de arena de la empresa Querandí, situada sobre la costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires, aproximadamente a los 37°23'20.06"S y 57°5'37.13"O (Figura 1). El área está caracterizada por un clima templado húmedo/subhúmedo, con un promedio de precipitaciones anuales de 800 mm y una temperatura media anual de 14°C (Servicio Meteorológico Nacional).

La dirección del viento predomina del norte. Se ubica sobre la provincia geológica Base del Salado (Braccini, 1980). Geológicamente las dunas están formadas por arena de grano fino a medio de la Formación Punta Médanos del Holoceno tardío-actual, que se caracterizan por una elevada permeabilidad, niveles freáticos profundos y ausencia de riesgos de inundación (IUSS-WRB, 2007). Es posible la formación de humedales temporarios y el crecimiento espontáneo de vegetación natural. Desde el punto de vista fitogeográfico, el área se encuentra incluida dentro del Distrito Pampeano Oriental, de la Provincia Fitogeográfica Pampeana, correspondiente al Dominio Chaqueño de la Región Neotropical (sensu Cabrena, 1976) o más ampliamente designada como los pastizales del Río de la Plata (sensu Soriano et al., 1992). La flora característica de la zona esta conformada por una composición típica de pastizales en zonas elevadas con principal representación de especies como *Panicum racemosum*, *Poa lanuginosa*, *Baccharis genistifolia* y *Andesmia incana*. En los sectores bajos de la zona se pueden encontrar *Cortaderia selloana*, *Juncus acutus*, *Imperata brasiliensis* y *Schoenoplectus californicus*. Por otra parte, considerando el área de estudio desde un punto de vista zoogeográfico, pertenece al dominio pampásico incluido en la sub región guayano-brasileña (Ringuelet, 1961). Diferencias palpables (malacofauna, batracofauna, opiliofauna, etc.) permitirían distinguir un sector Tandílico, determinado por el sistema serrano septentrional o Tandilia, y un sector Costero que coincide con la faja litoral de médanos y conchillares en ponderable extensión cubierto por talares.

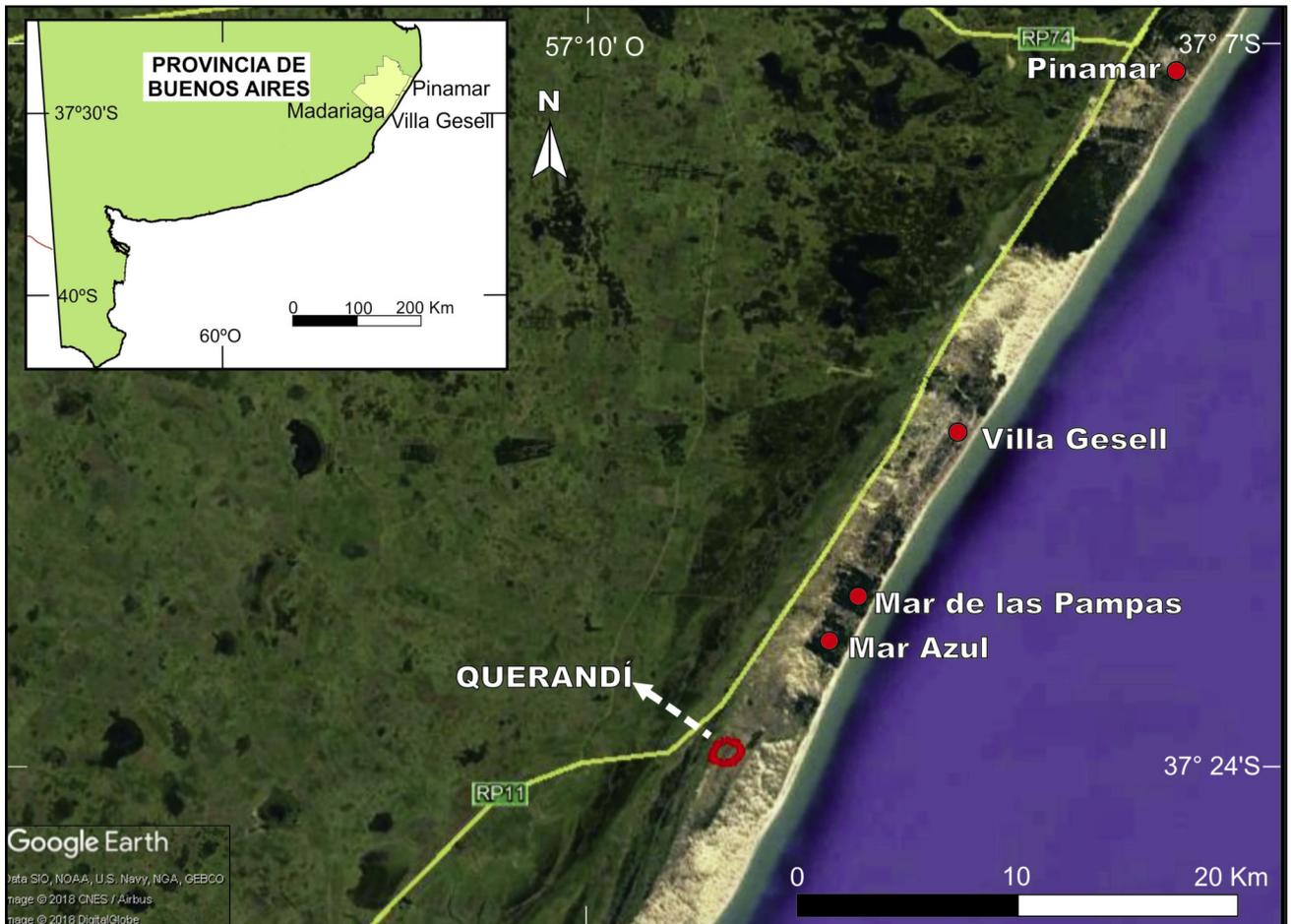


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el análisis de impacto de la actividad de extracción de arena sobre la distribución de la especie *Ctenomys talarum*, el área de estudio fue dividida en 4 sectores de la arenera considerando el año en que finalizó la extracción de sedimento en cada uno de ellos. De esta manera, los distintos sectores trabajados se denominaron como 2006, 2007, 2009 y 2011. Se consideró dividir el área de esta manera para establecer si el comportamiento de distribución de la especie se modificaba entre ellos, teniendo en cuenta que la estructura fisonómica de la vegetación se encuentra más estable en el sector considerado 2006, mientras que en el sector 2011 la cobertura vegetal es alta pero su fisonomía no está tan claramente definida.

Tabla 1. Superficie en ha de los sectores relevados.

Sector	Superficie (ha)
2006	3,31
2007	7,75
2009	2,15
2011	2,94
Conservación	4,13

También se relevó un quinto sector denominado “Conservación”, ubicado en el centro del área de estudio y rodeada por los pasivos de explotación analizados, la misma corresponde con un área de interduna caracterizada por pastizales densos de *Cortaderia selloana*, que fue preservada virgen y que no sufrió impacto de la actividad extractiva. Está área se mantuvo intacta, es decir, se la consideró como un área protegida, con la intención de que este sector funcione como fuente de semillas para una posterior repoblación vegetal de las áreas impactadas, de modo que actúe como una especie de remediador o reparador del impacto de explotación de la actividad extractiva (Figura 2). En la tabla 1 se observan las superficies medidas en hectáreas de las áreas analizadas.

Se llevó a cabo un relevamiento in situ de las áreas analizadas. El relevamiento consistió en 16 campañas ocurridas entre la primavera del 2016 y el invierno de 2017, las cuales correspondieron con una campaña por sector para cada estación del año. En cada campaña se realizó un relevamiento exhaustivo de toda el área de cada sector en búsqueda de puntos de actividad de individuos de *C. talarum*. De este modo, se registró la actividad de la especie a lo largo de las distintas estaciones del año. A tal efecto, se consideró la ocurrencia de actividad de *C. talarum* cuando se observaban agrupaciones de montículos de sedimento, los cuales son característicos del modo de

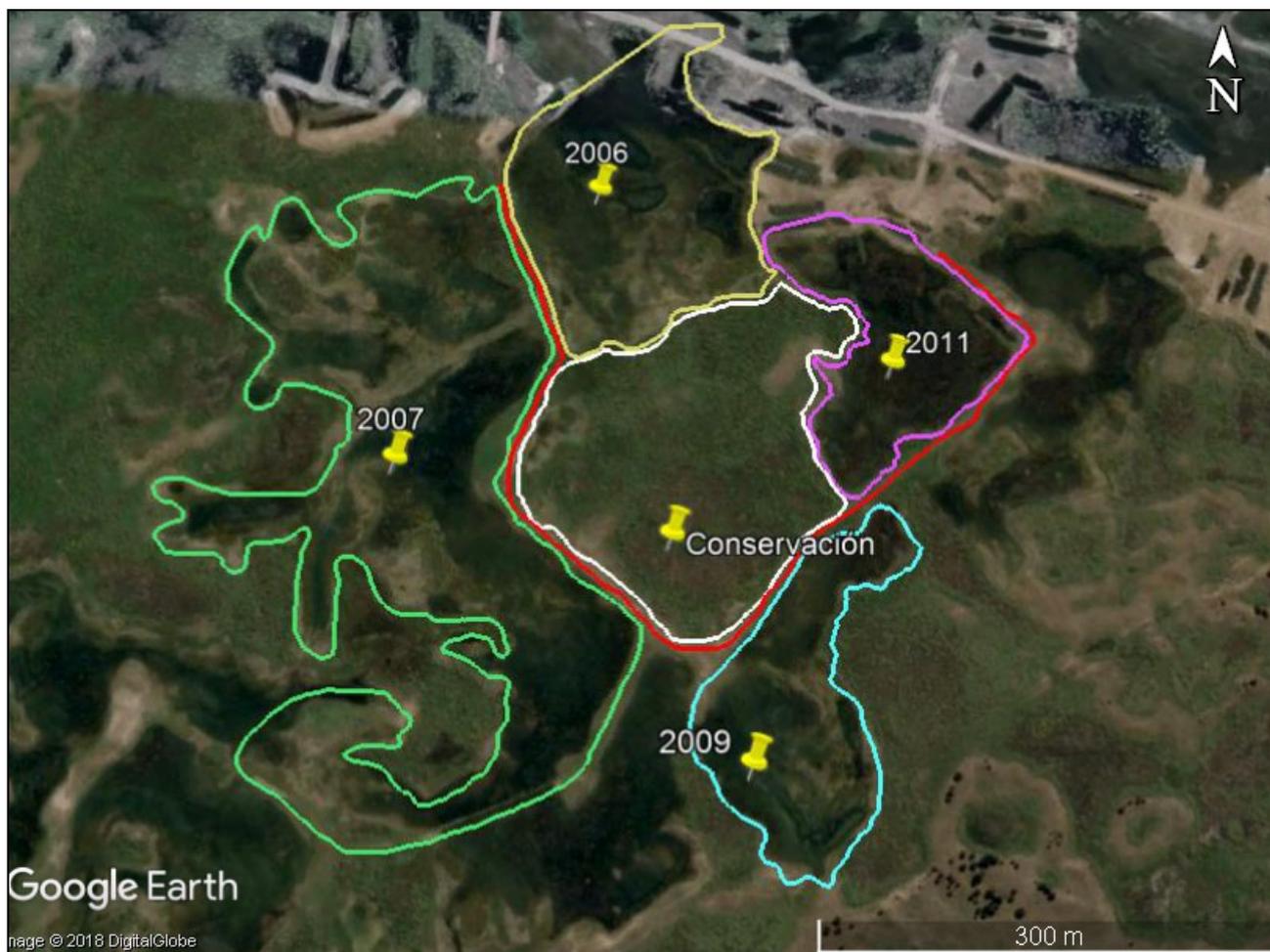


Figura 2. Mapa de los sectores relevados. Se pueden ver los límites de cada área, la línea en rojo representa las viejas pistas de laboreo entre los paños.

excavación de estos organismos. Estos puntos fueron georreferenciados con un GPS modelo Garmin Etrex Vista. Los datos del GPS fueron descargados con un software específico de libre acceso y luego montados en el programa Google Earth para generar los mapas de distribución.

El hábito extractivo de la arena en esta minera fue la utilización de paños para realizar la extracción del sedimento, los cuales estaban limitados por pistas de laboreo para el ingreso de los camiones y las maquinarias ocupadas en la extracción. De tal manera, los límites de cada terreno generan hacia el interior de cada pasivo de explotación unos terraplenes que se encuentran asociados a las pistas de laboreo, en sus límites internos, o bien a los bordes de las explotaciones en los límites exteriores. De tal manera se reconocen dos sectores en cada pasivo de explotación uno contiguo al límite del pasivo, hacia el interior del mismo, y otro en el área central de cada pasivo. Por este motivo, los puntos de actividad fueron identificados como internos y externos, considerando como externos a aquellos ubicados en los terraplenes o zonas elevadas asociadas a los mismos, y como internos aquellos que se encontraron en sectores centrales de los pasivos de explotación.

## RESULTADOS

En las figuras 3 a 6 se encuentran representadas los puntos de actividad de los individuos de *Ctenomys talarum* en los distintos pasivos de explotación analizados y en el área de conservación.

Se puede observar que en las áreas correspondientes a los pasivos de explotación la distribución de la actividad de los individuos de la especie *C. talarum* se ubica especialmente en los sectores externos y se encuentra actividad considerablemente menor en los sectores centrales de los mismos. Este hecho puede corroborarse a través del porcentaje de actividad de cada pasivo de explotación donde en todos los casos y en todas las estaciones el porcentaje de actividad nunca fue menor al 70% en el sector externo de los pasivos de explotación. Más allá de que la distribución sea periférica en los sectores explotados, en todas las áreas se ha mantenido una actividad aproximadamente constante durante todo el año, situación que se puede evidenciar por los puntos de actividad contabilizados en cada sector analizado (Tabla 2).

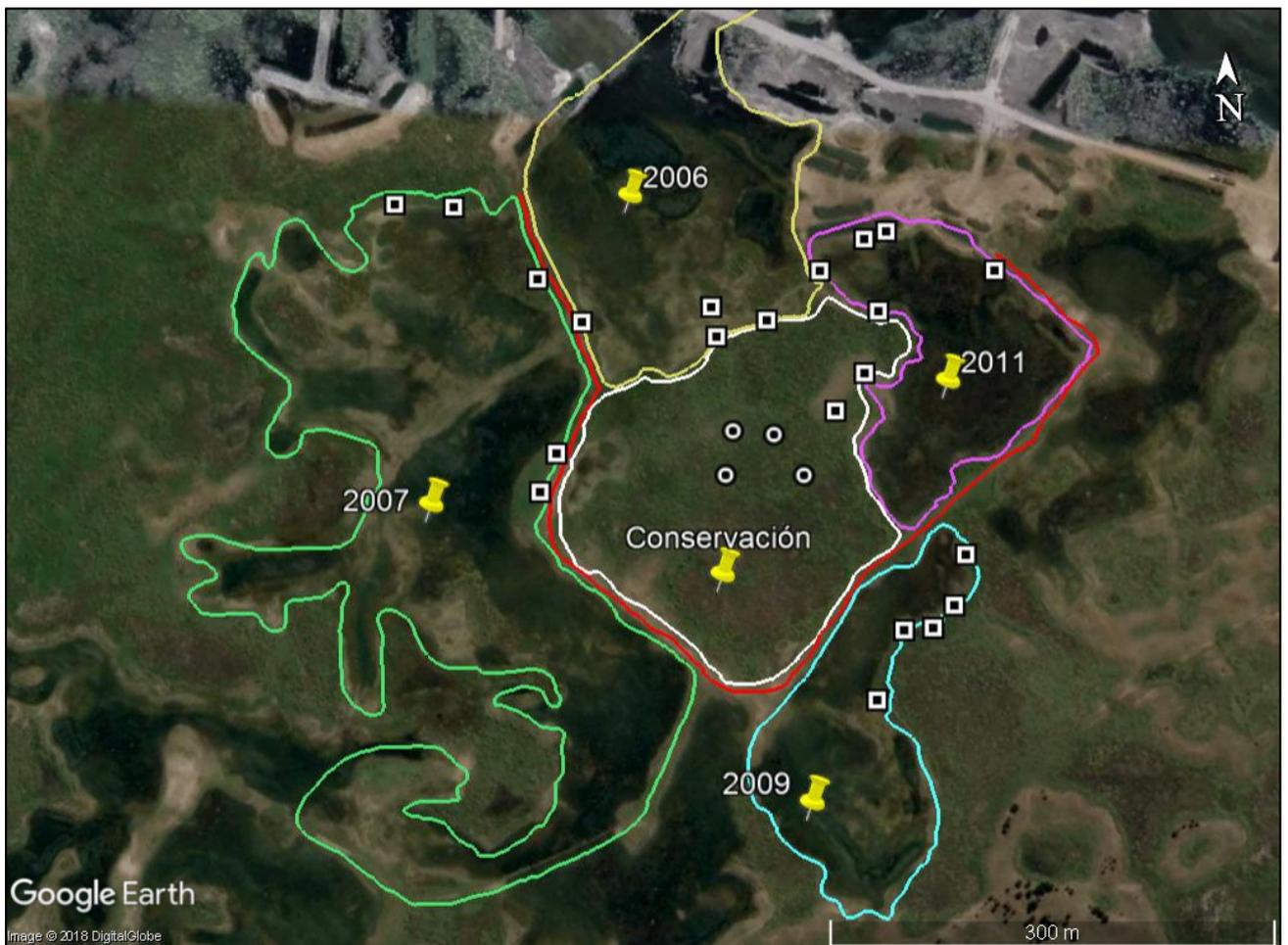


Figura 3. Distribución de actividad de Invierno. Las marcas cuadradas representan puntos de actividad externos, mientras que las marcas redondas representan puntos de actividad interno de cada área analizada.

**Tabla 2. Cantidad de puntos de actividad por sector y por estación. Ac. In.: Actividad Interna, Ac. Ex.: Actividad Externa, % Ac. In.: Porcentaje de actividad interna, % Ac. Ex.: Porcentaje de actividad externa.**

Sector	Actividad	Invierno	Otoño	Primavera	Verano
2006	Ac. In.	0	1	2	0
	Ac. Ex.	4	6	5	7
	Total	4	7	7	7
	% Ac. In.	0	14	29	0
	% Ac. Ex.	100	86	71	100
2007	Ac. In.	0	2	1	1
	Ac. Ex.	5	5	6	5
	Total	5	7	7	6
	% Ac. In.	0	29	14	17
	% Ac. Ex.	100	71	86	83
2009	Ac. In.	0	0	1	1
	Ac. Ex.	5	4	3	3
	Total	5	4	4	4
	% Ac. In.	0	0	25	25
	% Ac. Ex.	100	100	75	75
2011	Ac. In.	0	0	0	0
	Ac. Ex.	5	5	7	5
	Total	5	5	7	5
	% Ac. In.	0	0	0	0
	% Ac. Ex.	100	100	100	100
Conservación	Ac. In.	4	6	6	5
	Ac. Ex.	2	1	0	1
	Total	6	7	6	6
	% Ac. In.	67	86	100	83
	% Ac. Ex.	33	14	0	17

Estos registros coinciden con las zonas más elevadas de los pasivos de explotación, que corresponden con los límites de los mismos, situados a continuación de las antiguas pistas de laboreo. Siendo estos terrenos altos, se alejan de los sectores deprimidos en las partes centrales.

En la única zona donde se observó el patrón opuesto, es decir, una actividad considerablemente mayor en la parte central, fue en el sector Conservación. Dicho sector fue mantenido como área protegida, sin sufrir impacto. Por otra parte, se encuentra en una cota más elevada con respecto a los demás sectores analizados.

El patrón de distribución de actividad de la especie analizada se mantiene constante en todas las estaciones del año. Esta situación implica que el perfil de actividad de la especie *C. talarum* es indistinta de las condiciones climáticas del área.

## DISCUSIÓN

El ambiente que habita *Ctenomys talarum* (tucu-tucu) está constituido por dunas (Mora et al., 2007). Este ambiente posee características complejas donde distintas fuerzas geológicas,

climáticas y vegetales interaccionan para generar un ecosistema dinámico con gran variación (Ehrenfeld 1990; Stallins y Parker, 2003). La topografía de los médanos determina condiciones microclimáticas que delimitan las especies vegetales que se pueden asociar en cada zona de la duna. Representan ecosistemas complejos con una alta variación interna (Van der Maarel, 1997), donde los elementos vegetales y la geomorfología definen los distintos sectores característicos del sistema dunar (Celsi, 2017). De forma natural dentro del área de conservación se observan grandes pastizales de *Cortaderia selloana*, mientras que en los sectores explotados se puede encontrar una mixtura entre las especies descritas *Schoenoplectus californicus*, *Androtrichum tryginum* o *Cyperus eragrostis*, en conjunto con pastos típicos de la zona de los géneros *Poa* o *Panicum* acompañado por hierbas como la marcela *Achyrocline satureioides*, la vara de oro *Solidago chilensis* o la altamisa *Ambrosia tenuifolia*. Considerando el estrato faunístico además de *Ctenomys talarum*, pueden encontrarse zorros grises pampeanos *Lycalopex gymnocercus*, liebre europea *Lepus europaeus*, se han observado también ñandúes *Rhea americana*, teros *Vanellus chilensis* el benteveo *Pitangus sulphuratus*, además de estos animales se han avistado ejemplares de



**Figura 4.** Distribución de actividad de Otoño. Las marcas cuadradas representan puntos de actividad externos, mientras que las marcas redondas representan puntos de actividad interno de cada área analizada.

sapo común *Rhinella arenarum*, además de animales domésticos que conviven en el área como perros *Canis familiaris*, vacas *Bos taurus*, gallinas *Gallus gallus*, y cerdos *Sus scrofa*.

La actividad minera es una actividad industrial con un carácter de impacto profundo sobre los ambientes en los que se desarrolla (Leopold, 1971; Gallego Valcarce, 1992; Lithgow et al., 2013). La estructura residual que se presenta como pasivo de explotación representa un neoeosistema (Morello et al., 2000) que dependiendo de las características del ambiente primigenio y del hábito de explotación se transformara en una neoforma dinámica con características particulares. De este modo se entiende que a pesar de la conservación de algunos elementos propios del ambiente natural que existía en este sector se desarrolla una neoforma con características propias que posee cualidades nuevas.

La topografía del campo, en el área del presente estudio, ha sufrido una clara modificación y ha experimentado un impacto severo. Como consecuencia de la actividad extractiva, se encuentran depresiones en los pasivos de explotación. Esta situación genera un contexto en donde, las condiciones del terreno, tienen como consecuencia la inundación y la presencia de agua superficial. Estas consideraciones son coherentes con lo observado en el campo, debido a que los sectores explotados presentan una modificación de su estructura donde, debido a

las deflaciones generadas por la actividad extractiva, se producen charcas temporales. Estas secuelas se encuentran generadas por las modificaciones producidas en la capacidad de percolación del suelo, asociada a la extracción de la capa de arena superficial. Este escenario se ve agravado por la presencia de un paleosuelo de características arcillosas en cota 8m (data sin publicar), que disminuye la infiltración del agua. Por este motivo, cabe la posibilidad de que debido a las modificaciones asociadas a la extracción de arena se produzca el desarrollo de una neoforma en el sentido de Morello et al. (2000).

Existe un antecedente de recuperación ambiental en el lugar de estudio que ha demostrado que las áreas están recomponiéndose en el estrato vegetal con un alto porcentaje de especies nativas (Fernandez Montoni et al., 2013). Sin embargo, este hecho, no implica que la fisonomía vegetal de los neoeosistemas representados por los pasivos de explotación, adquieran una naturalidad de pastizal. Las especies encontradas en los pasivos de explotación, son típicas de sectores de bajo de dunas asociadas a sectores inundables, mezcladas con algunos elementos de pastura dunícola. La composición de las comunidades vegetales de los pasivos ambientales analizados, podría indicar la modificación de la fisonomía vegetal de estos sectores de pastizales a neohumedales.

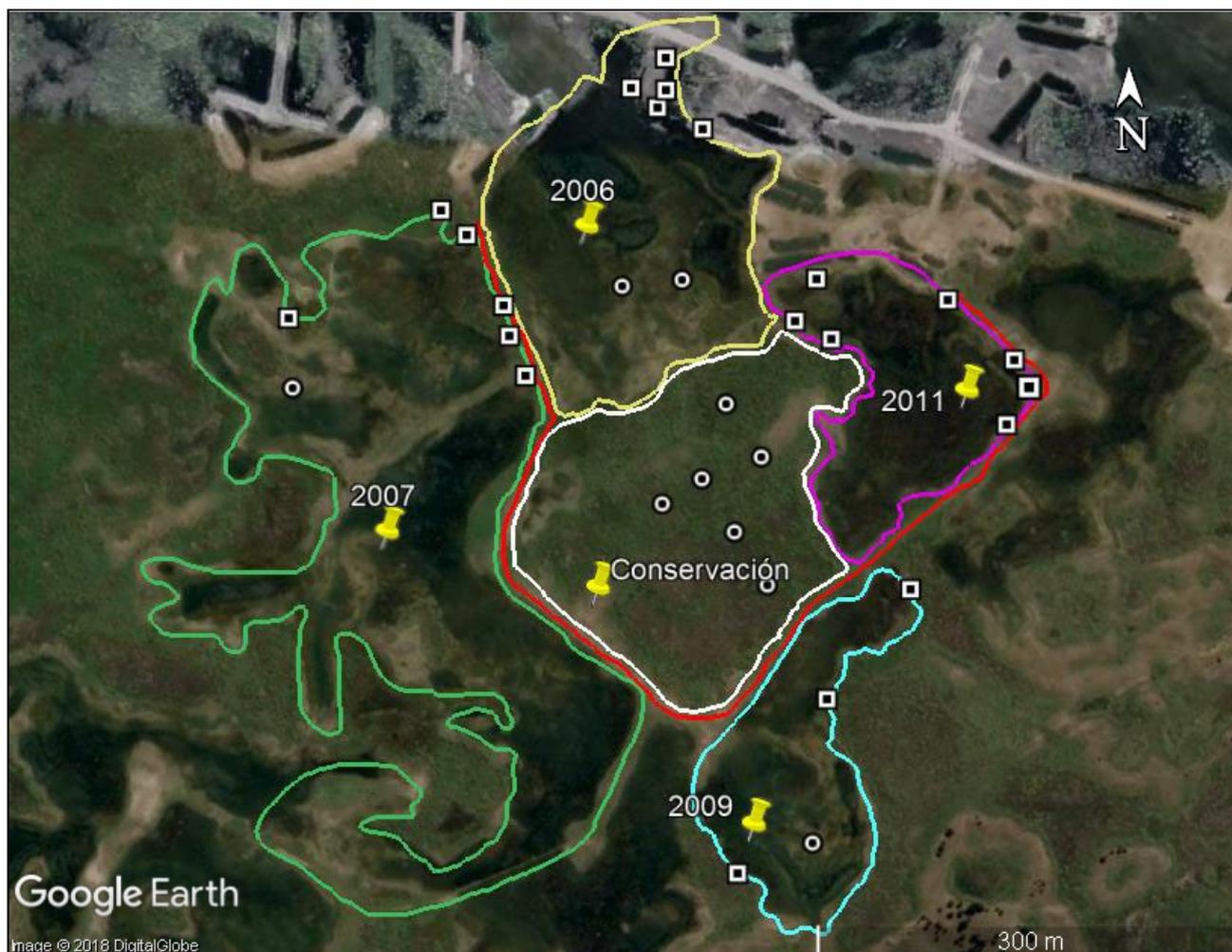


Figura 5. Distribución de Actividad de Primavera. Las marcas cuadradas representan puntos de actividad externos, mientras que las marcas redondas representan puntos de actividad interno de cada área analizada.

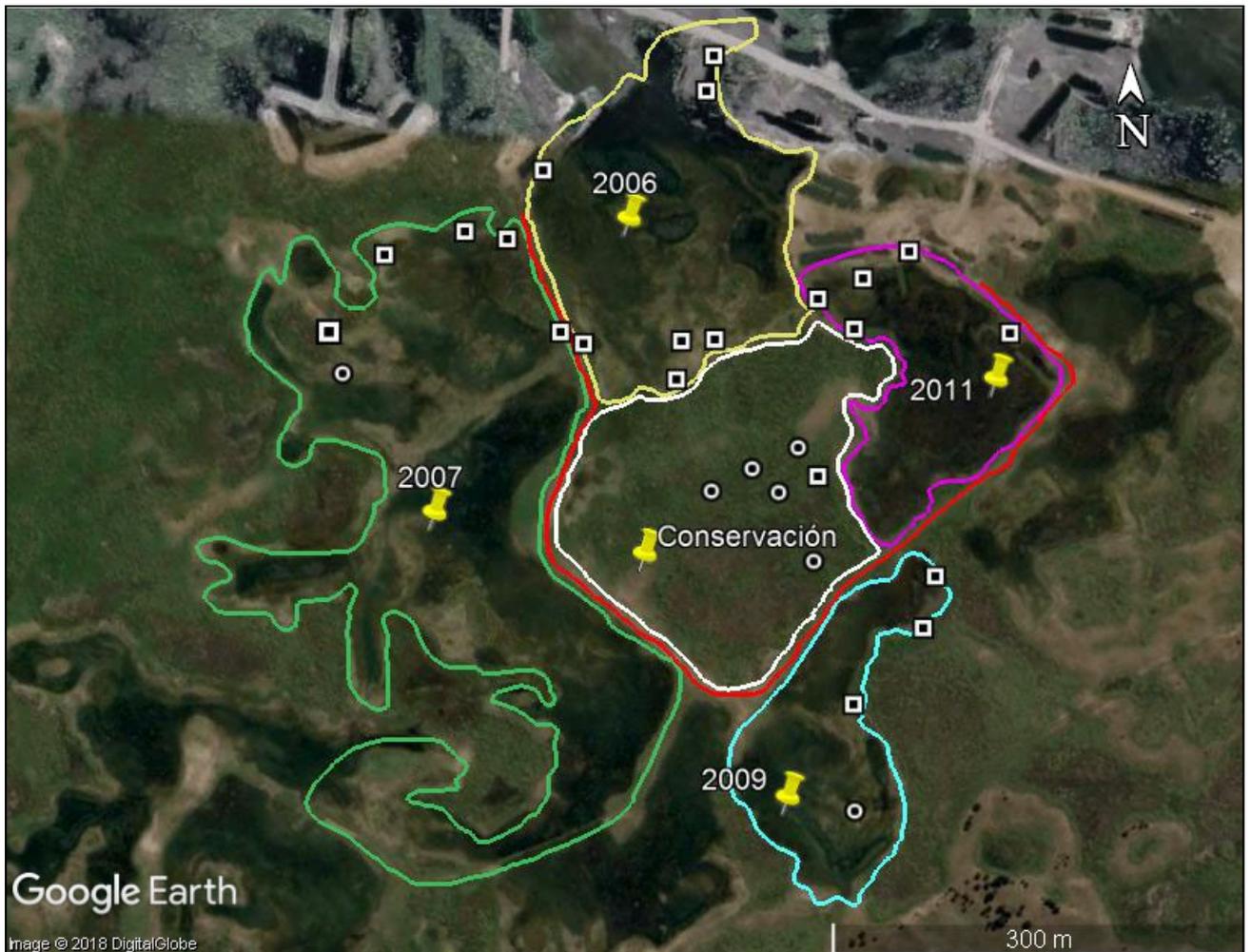
De esta manera, la presencia de neohumedales representa una condición continua o semi continua de desarrollo de encharcamientos. Con lo cual, independientemente de que se esté desarrollando una estación húmeda o seca, existe la manifestación de agua superficial. Por lo tanto, esta situación no se modifica entre verano e invierno, manteniéndose este perfil durante todo el año. De mismo modo, el patrón de actividad de la especie en estudio en los sectores explotados es independiente de las condiciones ambientales húmedas o secas del clima anual de la región en la que se encuentra el área de impacto. Un escenario como el descrito representa un evento sin dudas desfavorable para *Ctenomys talarum*. Por ser una especie excavadora, que desarrolla sus cuevas a aproximadamente unos 30 cm (Antinuchi y Busch, 1992) de la superficie del suelo es claro que en lugares que temporalmente se encuentran anegados, no pueda desarrollar su actividad fosorial. Por lo tanto se refugia en sectores elevados del área que le ofrecen las condiciones adecuadas para llevar a cabo sus hábitos de vida.

Los individuos de *Ctenomys talarum* se desarrollan en suelos que poseen una humedad relativa de 4 a 5 % en condiciones normales (Malizia et al., 1991; Antinuchi y Busch, 1992). Por otra parte, se observó que la humedad del suelo puede modelar la distribución de los individuos de otra especie de *Ctenomys*, la especie *Ctenomys minutus*, siendo uno de los elementos

que determinan la presencia o ausencia de representantes de la especie en un área determinada (Galiano et al., 2016). Siendo de este modo, posible que esta situación también tenga relevancia al momento de configurar la distribución de los individuos de *Ctenomys talarum* en los sectores explotados.

Es de destacar como positivo que los individuos de la especie no han quedado completamente excluidos del área a raíz de la actividad, su actividad todavía se puede corroborar en el área (Taverna et al., 2016). Sin embargo, el nivel hasta el cual puedan desarrollarse estos individuos deberá ser evaluado con futuros estudios. Si bien es muy probable que la actividad de *Ctenomys talarum* se encuentre disminuida en las áreas centrales de los sectores explotados, los sectores elevados de los mismos, correspondientes con los límites de los terrenos, podrían funcionar como refugios para el desarrollo de la especie. Estos límites, que además se encuentran a continuación de las pistas de laboreo que conectaban los distintos sectores de la arenera, pueden oficiar de conectores manteniendo el contacto entre los distintos sectores explotados y el resto del cuerpo de dunas fuera del área analizada.

De este modo, y considerando la teoría ecológica de corredores, los límites de las áreas estudiadas podrían funcionar como corredores biológicos a escala, que mantengan la conexión ecológica entre los sectores interrumpidos por los pasivos



**Figura 6.** Distribución de Actividad de Verano. Las marcas cuadradas representan puntos de actividad externos, mientras que las marcas redondas representan puntos de actividad interno de cada área analizada.

de explotación. Los corredores biológicos son una herramienta potencial para favorecer la conectividad (Bennett, 2004). El concepto de corredor biológico o ecológico implica la conectividad entre zonas protegidas y áreas con una biodiversidad importante con el fin de contrarrestar la fragmentación del hábitat, causa principal de la extinción de animales y plantas. (Aldekozea y Colin 2004). Por lo tanto, los individuos de *C. talarum* podrían utilizar los sectores laterales de los pasivos de explotación para poder atravesar el área de impacto, utilizando como zona de contención el área de conservación, de modo de mantener la dinámica poblacional en ese sector de la barrera medanosa sin limitar

la vagilidad propia del animal, hecho fundamental para el normal desarrollo de cualquier especie.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Sra. Margarita Arbeiz por su apoyo para el desarrollo de este tipo de estudios, a la Dra. Karen Halpern por la revisión del manuscrito, a la Mg. Sc. María Juliana Bó por su colaboración en la figura 1, al Sr. Miguel Ángel Taverna por la colaboración en el trabajo de campo y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-PBA) por el financiamiento para llevar adelante el estudio.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ACOSTA SARIEGO, J. R., 2006.  
Bioética Global Sustentable como tendencia en América Latina y el Caribe.  
*Revista Latinoamericana de Bioética*, 6 (11): 88 - 117.
- ALDEKOZEA, I Y F. COLIN, 2004.  
Sistematización de la Experiencia de la Conservación de la Biodiversidad en la Península de Nicoya.  
*PNUD- Costa Rica*. 17 p.
- ANTINUCHI, C.D. Y C. BUSCH, 1992.  
Burrow structure in the subterranean rodent *Ctenomys talarum*.  
*Z. Säugetierkd*, 57: 163-168.

- AYALA CAICEDO, F.J., L., VALDILLO FERNÁNDEZ, C., LÓPEZ JIMENO, M. P., ARAMBURU MAQUA, M., ESCRIBANO BOMBIN Y R., ESCRIBANO BOMBIN, 1996.  
Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.  
*Instituto Tecnológico Geo-Minero de España, Madrid*
- BENGTSSON, J., P., ANGELSTAM, T., ELMQVIST, U., EMANUELSSON, C., FOLKE, M. IHSE, F., MOBERG Y M. NYSTRÖM, 2003.  
Reserves, resilience and dynamic landscapes.  
*AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(6): 389-396.
- BENNETT, A.F. 2004.  
Enlazando el paisaje: el papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre.  
*San José, CR, UICN*. 278 p.
- BRACACCINI, O.I. 1980.  
Cuenca del Salado.  
*En: Leanza AF (ed) Geología regional Argentina. Edit, Academia Nacional de Ciencias Córdoba, pp 407-417*
- BROWN, A. C. Y A. MCLACHLAN, 2002.  
Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025.  
*Environmental Conservation*, 29: 62-77.
- BUSCH, C., C. D., ANTINUCHI, J. C., DEL VALLE, M. J., KITTLEIN, A. I., MALIZIA, A.I., VASSALLO, Y R. R. ZENUTO, 2000.  
Population ecology of subterranean rodents.  
*In: Life underground. Edited by E.A. Lacey, J.L. Patton, and G.N. Cameron. University of Chicago Press, Chicago. pp. 183-226.*
- CABALLÉ M. Y M. BRAVO ALMONACID. 2006.  
Minería Costera.  
*En: Isla F. I. y C. A. Lasta. Manual de Manejo Costero para la Provincia de Buenos Aires. EUDEM. 281 pp.*
- CABALLÉ M., D. GANUZA, N. CORIALE Y M. BRAVO ALMONACID, 2005.  
Recursos areneros en el delta del paraná y litoral atlántico.  
*En: De Barrio R. E., R.O Etcheverry, M. F. Caballé y E. Llambías (Eds.): Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata, 2005. Cap. XXVIII: 435-440.*
- CABRERA, A.L. 1976.  
Regiones fitogeográficas argentinas.  
*Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo II. En: Acme SACI (ed), Buenos Aires, Argentina*
- CELSI, C.E. 2017.  
La vegetación de las dunas costeras pampeanas.  
*En: Athor, J.; Celsi, C. E. 2017. La costa Atlántica de Buenos Aires. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. 656 pp. ISBN 978-987-3781-30-8.*
- CONTRERAS, J.R. 1973.  
El tucú-tucú y sus relaciones con los problemas del suelo en la Argentina.  
*IDIA Suppl.*, 29: 14-36.
- DE LUCA, E., C., NOVELLI, F., BARBATO, P., MENEGONI, M., IANNETTA Y G., NASCETTI, 2011.  
Coastal dune systems and disturbance factors: monitoring and analysis in central Italy.  
*Environmental Monitoring and Assessment*, 183: 437-450.
- DEL RÍO, J. L.; F., PANTANIDA, D., ANTENUCCI, H. D., MOLINA, A., CICCINO, N., DENISIENIA, G. A., MARTÍNEZ, B. D., TAVERNA, M. FARENGA, Y S., LUPO, 2017.  
Huella geomorfológica de actividades mineras en las dunas de la barrera oriental de la costa atlántica bonaerense: relación con otras actividades.  
*III Congreso Argentino de Áridos. 15 al 17 de noviembre de 2017.*
- EHRENFELD, J.G. 1990.  
Dynamics and processes of barrier-island vegetation.  
*Rev Aquat Sci*, 2: 437-480
- FAGGI, A. Y J., DADON, 2011.  
Temporal and spatial changes in plant dune diversity in urban resorts.  
*Journal of Coastal Conservatism*, 15: 585-594.
- FERNÁNDEZ MONTONI, M. V., M. F., HONAINÉ, Y J. L. DEL RÍO, 2014.  
An Assessment of Spontaneous Vegetation Recovery in Aggregate Quarries in Coastal Sand Dunes in Buenos Aires Province, Argentina.  
*Environmental management*, 54(2): 180-193.
- GALIANO, D., B. B., KUBIAK, L. S., MENEZES, G. E., OVERBECK Y T. R. O. DE FREITAS, 2016.  
Wet soils affect habitat selection of a solitary subterranean rodent (*Ctenomys minutus*) in a Neotropical region.  
*Journal of Mammalogy*, 97(4), 1095-1101.

- GALLEGO VALCARCE, E. Y L., VADILLO FERNÁNDEZ, 1992.  
Reclaiming areas degraded by mining operations.  
*En: Planning the Use of the Earth's Surface. Springer Berlin Heidelberg. pp. 393-408.*
- HANSELL, M. H., 1993.  
The ecological impact of animal nests and burrows.  
*Functional Ecology, 7: 5-12.*
- HAWKSWORTH, D.L. 1992.  
Litmus tests for ecosystem health: the potential of bioindicators in the monitoring of biodiversity.  
*En: Swaminathan MS, Jana WS (Eds.) Biodiversity: Implications for global food security. Madras, Macmillan India: 184-204.*
- HUXMAN, T. E., J. M., CABLE, D. D., IGNACE, J. A., EILTS, N. B., ENGLISH, J., WELTZIN, Y D. G., WILLIAMS, 2004.  
Response of net ecosystem gas exchange to a simulated precipitation pulse in a semi-arid grassland: the role of native versus non-native grasses and soil texture.  
*Oecologia, 141(2): 295-305.*
- IUSS GRUPO DE TRABAJO WRB. 2007.  
Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007.  
*Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma*
- KETCHUM, B.H. (Ed.), 1972.  
The Water's Edge: Critical Problems of the Coastal Zone.  
*MIT. Press, Boston.*
- LEOPOLD, L. B. 1971.  
A procedure for evaluating environmental impact  
*(Vól. 28, No. 2). US Dept. of the Interior.*
- LITHGOW D., M. L., MARTÍNEZ, J. B., GALLEGU-FERNÁNDEZ, P. A., HESP, P., FLORES Y S., GACHUZ, 2013.  
Linking restoration ecology with coastal dune restoration.  
*Geomorphology, 199:214-224*
- MALIZIA, A.I., A. I., VASSALLO, Y C., BUSCH, 1991.  
Population and habitat characteristics of two sympatric species of *Ctenomys* (Rodentia: Octodontidae).  
*Acta Theriol. 36: 87-94.*
- MARCOMINI, S.C. Y R. LÓPEZ, 2006.  
Geomorfología costera y explotación de arena de playa en la provincia de Buenos Aires y sus consecuencias ambientales.  
*Rev Bras Geomorfol., 7(2): 61-71*
- MARTÍNEZ, M.L., P. A., HESP Y J. B., GALLEGU-FERNÁNDEZ, 2013.  
Coastal dunes: human impact and need for restoration.  
*En: Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., Hesp, P.A. (Eds.), Coastal Dune Restoration. Springer Verlag, Germany, pp. 1-14 (Chapter 1).*
- MORA, M. S., E. P., LESSA, A. P., CUTRERA, M. J., KITTLEIN Y A. I., VASSALLO, 2007.  
Phylogeographical structure in the subterranean tuco-tuco *Ctenomys talarum* (Rodentia: Ctenomyidae): contrasting the demographic consequences of regional and habitat-specific histories.  
*Molecular Ecology, 16(16): 3453-3465.*
- MORELLO, J, H., G. D., BUZAI, C., BAXENDALE, A., RODRIGUEZ, S, D., MATTEUCCI, R., E., GODAGNONE, Y R. R., CASAS, 2000.  
Urbanización y consumo de tierra fértil.  
*Ciencia Hoy, 10(55): 50 - 61.*
- NORDSTROM, K.F. 2008.  
Beach and Dune Restoration.  
*Cambridge University Press, Cambridge.*
- RINGUELET, R. A. 1961.  
Rasgos fundamentales de la zoogeografía de la Argentina.  
*Physis, 22(63): 151-170.*
- ROBERTS, C. M. Y J. P., HAWKINS, 1999.  
Extinction risk in the sea.  
*Trends in Ecology and Evolution, 14: 241-246.*
- SORIANO A., R. J. C., LEON, O. E., SALA, R. S. LAVADO, V. A., DEREGIBUS Y M. A., CAUHEPE, 1992.  
Río de la Plata grasslands.  
*En: Coupland RT (ed) Natural grasslands: Introduction and Western hemisphere, Ecosystems of the world 8A. Elsevier, Amsterdam, pp 367-407*

STALLINS, J. A Y R. J. PARKER, 2003.

The influence of complex systems interactions on barrier island dune vegetation pattern and process.

*Ann Assoc Am Geogr* 93:13-29

TAVERNA, B. D., D., ANTENUCCI, Y J. L., DEL RÍO, 2016.

Efecto de la minería de áridos sobre la dinámica poblacional de la especie *Ctenomys talarum* en un yacimiento de Gral. Madariaga.

*Congreso Biólogos en Red XI. ISBN 1853-3426*

VAN DER MAAREL, E., 1997.

Dry coastal ecosystems: scope and historical significance.

*En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems. Elsevier, 2a: 1-6*

WOODS, C.A., 1984.

Histricognath rodents.

*In: Orders and families of recent mammals of the world. Edited by S. Anderson and J.K. Jones. John Wiley, New York. pp. 389-446.*

# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas Técnicas, Reseñas de Libros, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y seguir estrictamente las siguientes instrucciones:

## a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado, total o parcialmente, con anterioridad.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o copyright), que los derechos de terceros (terceras partes) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se podrán recibir trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y la Dirección de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico

## b) Sobre el formato y la extensión del texto, tipos de letra, páginas, párrafos y leyendas:

- La versión original deberá ser editada en Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra Times New Roman tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.  
El título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.
- Debajo del título, el texto centrado, en letra Times New Roman tamaño 10, con los datos de los autor/es y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. En el caso que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras, las "Palabras clave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords". A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea inglés, la primera sección será el "Abstract" de hasta 250 palabras, seguido de las "Keywords" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Resumen" y las correspondientes "Palabras clave" en español. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "Resumo" de hasta 200 palabras, seguido de las "Palavras chave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords" en inglés. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a interlineado sencillo, con sangría de un centímetro y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán

los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.

- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superior e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.
- La extensión no deberá superar las 20 páginas en el caso de Artículos Originales. En el caso de Artículos Invitados la extensión podrá ser superior, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con la Dirección de la Revista y el Comité Editorial. En el caso de las Notas Técnicas la extensión no deberá superar las 3 carillas, y en el resto de las situaciones mencionadas una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo:  $Sy/Xm$  en lugar de  $\frac{Sy}{Xm}$
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo,  $Ca^{2+}$  y  $CO_3^{-2}$ , no como  $Ca^{++}$  o  $CO^{-3}$ .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo:  $^{18}O$ .
- Donde sea posible se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como  $P_2O_5$ ).

## c) Sobre el formato de figuras y tablas:

- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja.  
Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de claridad. Deben

- tener una resolución mínima de 300 dpi.
- Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma, la que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben ser pancromáticas, contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg, .pdf o .eps. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.  
Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Se deben remitir como archivo de texto y no como imagen.
- Las Tablas serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis. Es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda.

#### **d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores**

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales

de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor o los autores. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del trabajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar “modificada a partir de ...” seguido de la cita del artículo original.

- A los autores que deseen incluir figuras tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:  
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
- Los artículos en textos:  
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:  
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,..... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).
- Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980):

---

CASIO, M.; MARCINUS, F; SALINA, R y HUBBARD, R.T., 1980. La caída del imperio romano. *Revista de Occidente*, Vol 180: 224-234.

- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo al siguiente modelo: Barker, A and C Jones 2007. Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En *Environmental Assessment Lecturer's Handbook*, ed. T B Fischer et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta-eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

#### e) Notas Técnicas

- Es un artículo original que describe un proceso o técnica sin incluir, necesariamente, una exposición teórica y datos. También puede referirse a un estudio de caso, el que por

lo novedoso de los datos que se obtienen o de las técnicas utilizadas, el/los autor/es consideran de interés su difusión. La extensión total del manuscrito, que no debe superar las 3 (tres) páginas y ajustarse a los parámetros mencionados en el punto b, incluye Resumen, Abstract, palabras clave, keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla acorde a lo establecido en el punto c. Las referencias bibliográficas deberán respetar lo establecido en el punto d.

#### f) Arbitraje

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.



**Revista de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
y al Ambiente**

**FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA**

ENVIAR A:

**Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería**  
Maipú 645 - Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) [ ]

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

\_\_\_\_\_ [ ]

3. Deseo comprar los artículos:

\_\_\_\_\_ [ ]

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

**FORMA DE PAGO**

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

**PRECIO DE COMPRA (Desde 01-12-2018):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **1900** Pesos
- Compra de número atrasado: **1450** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **350** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **65** Dólares
- Compra de número atrasado: **50** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **15** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-12-2018):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **1700** Pesos, en formato electrónico, y **2900** Pesos en edición papel
- Suscripción Instituciones: **6800 / 11600** Pesos
- Compra de número atrasado: **1450** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **350** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **58** Dólares, en formato electrónico, y **100** Dólares en edición papel
- Suscripción Instituciones: **216 / 400** Dólares
- Compra de número atrasado: **50** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **15** Dólares por artículo

**Envíos fuera de Argentina:** se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: [www.correoargentino.com.ar](http://www.correoargentino.com.ar)

*Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en [www.asagai.org.ar](http://www.asagai.org.ar)*

**Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la revista.**



**1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y  
2º Congreso Argentino de Geología  
Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**

**1st IAEG South American Regional Conference and  
2nd Argentine Congress of Geology  
Applied to Engineering and the Environment**

Córdoba, 19 al 22 de octubre de 2021

[congreso@asagai.org.ar](mailto:congreso@asagai.org.ar)

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2018  
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Diciembre de 2018



**ASAGAI**

ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Mapa geotécnico de la ciudad de Treinta y Tres, Uruguay

*Ferrizo, Héctor - Abre, Paulina - Blanco, Gonzalo - López, Valentina*

Geología aplicada a la detección de la fuente de filtraciones en la Boca II del túnel de aducción del complejo hidroeléctrico Futaleufú, provincia de Chubut

*Celli, Alejandro E. - Reynal, Héctor R.*

Movilidad de sales por ascenso capilar a partir del acuífero freático en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca

*Lexow, Claudio - Scherger, Leonardo - Pera Vallejos, Guillermo - Bauer, Emiliano*

Patrón de micro distribución de *Ctenomys Talarum*, su rol como bioindicador en un pasivo de explotación de arenas en dunas costeras

*Taverna, Bernardo Daniel - del Río, Julio Luis - Antenucci, Daniel*

Portada: Acantilado activo y remoción en masa sobre sedimentitas terciarias, Las Grutas, provincia de Río Negro. *Fotografía: María Paula Bunicontro*

**Revista de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
y al Ambiente**

